

УДК 524.316:7.022-352:510.84

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ КИНЕМАТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕР ОДИНОЧНЫХ C-rich post-AGB-ЗВЕЗД

© 2024 В. Г. Клочкова^{1*}, В. Е. Панчук¹, Н. С. Таволжанская¹, М. В. Юшкин¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 РоссияПоступила в редакцию 18 сентября 2024 года; после доработки 13 октября 2024 года;
принята к публикации 14 октября 2024 года

Для поиска и изучения неустойчивости в атмосферах избранных post-AGB-звезд выполнена многолетняя спектроскопия высокого разрешения ($R \geq 60000$) со спектрографом НЭС 6-м телескопа БТА. В оптических спектрах одиночных звезд, ассоциированных с ИК-источниками IRAS z02229+6208, IRAS 04296+3429, IRAS 07134+1005, IRAS 07430+1115, IRAS 19500–1709, IRAS 22223+4327, IRAS 23304+6147, прошедших третье перемешивание, зарегистрированы малоамплитудные пульсации, расщепление и/или асимметрия профилей абсорбций с низким потенциалом возбуждения (преимущественно абсорбций металлов s-процесса), а также переменность комплексного профиля H α . Максимальная амплитуда пульсаций A_V зарегистрирована у звезд в системах IRAS 07134+1005 и IRAS 19500–1709, имеющих максимальные значения температуры среди звезд изученной выборки. Для двух звезд выборки найдена стратификация лучевой скорости в атмосфере. По интенсивности ИК-триплета кислорода O I λ 7774 сделана оценка светимости изученных звезд, при этом для звезды в системе IRAS 07430+1115 получена светимость $\lg L/L_{\odot} \approx 3.1$ внутри диапазона типичных значений светимости для post-AGB-звезд, что устраняет парадокс светимости и исходной массы этого объекта.

Ключевые слова: *звезды: эволюция — звезды: post-AGB — звезды: атмосферы — звезды: оболочки — методы: спектроскопия*

1. ВВЕДЕНИЕ

Объекты данного исследования — это одиночные звезды после асимптотической ветви гигантов (AGB) с исходными массами в интервале $1-8 M_{\odot}$, прошедшие эволюционные этапы с нуклеосинтезом и третьим перемешиванием, а также эпизоды с потерей массы за счет звездного ветра с различным темпом. На стадиях слоевого горения водорода и гелия звезды испытывают потерю вещества с темпом в интервале $10^{-8}-10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ (Höfner and Olofsson, 2018). Темп потери массы за счет ветра значительно снижается при переходе от AGB-стадии к последующей post-AGB-стадии (Blöcker, 1995a; b). Этот эволюционный переход, занимающий, согласно теоретическим расчетам Miller Bertolami (2016), временной промежуток у звезд разных масс от нескольких сотен до многих тысяч лет, происходит с отделением оболочки от звезды. По сути, эта недолгая post-AGB-стадия эволюции звезд промежуточных масс представляет собой переход от

звезды к планетарной туманности, поэтому их зачастую называют протопланетарными туманностями (PPN).

В настоящее время выборка детально изученных звезд с избытками углерода и тяжелых металлов (далее C-rich post-AGB-звезды) невелика, поскольку их видимый блеск существенно снижается из-за поглощения их собственной пылевой оболочкой. Однако интерес астрофизиков к AGB-звездам и к ближайшим их потомкам — post-AGB-звездам неуклонно растет. Этот рост обусловлен, прежде всего, их влиянием на эволюцию химического состава галактик, так как в недрах этих звезд, находящихся на кратковременной эволюционной стадии со сложной внутренней структурой, переменностью блеска и спектров, возникают физические условия для синтеза ядер тяжелых металлов и последующего их выноса в звездную атмосферу. За счет этих процессов AGB-звезды являются основными поставщиками (свыше 50%) всех элементов тяжелее железа, синтезированных за счет s-процесса, суть которого состоит в медленной нейтронизации ядер. Результаты расчетов синтеза и выноса элементов представлены авторами в ра-

*E-mail: Valentina.R11@yandex.ru

ботах Herwig (2005), Di Criscienzo et al. (2016) и Liu et al. (2018).

Согласно современным представлениям об эволюции AGB-звезд (Herwig, 2005), после истощения гелия в ядре изменяется структура звезды: образуется вырожденное углеродно-кислородное ядро, окруженное альтернативными энергетически активными слоями горения гелия и водорода. Основную часть времени энерговыделение обеспечивает водородный слой, а прилегающий к вырожденному ядру гелиевый слой при этом остается инертным. Между этими энерговыделяющими слоями образуется тонкий слой, так называемый «Heintershell», в котором по мере роста температуры происходит возгорание гелия и накопление углерода, что создает условия для важнейшей реакции $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$. За счет этой реакции формируются нейтроны, обеспечивающие последующий синтез ядер тяжелых металлов и их эффективное перемешивание (см. детальное описание этих процессов и необходимые ссылки в Cristallo et al., 2011). Вынос свеженаработанных атомов в околозвездную среду обусловлен нестабильностью в атмосферах сверхгигантов за счет звездного ветра и сброса оболочек, из-за пульсаций и иных кинематических процессов, что проявляется и в особенностях их спектров.

Фотометрическая и спектральная переменность звезд на стадии post-AGB активно исследуется уже несколько десятилетий после их отождествления с ИК-источниками. Отметим результаты, полученные группой Б. Хривнака в ходе выполнения программы поиска и уточнения периодов переменности блеска для дюжины C-rich post-AGB-звезд. В недавней публикации Hrivnak et al. (2022), объединив многолетние фотометрические данные обсерватории университета Вальпараисо (VUO, IN 46383, USA) с доступными данными ASAS (Kochanek et al., 2017), определили для них амплитуду переменности блеска ΔV и совокупность периодов. Авторы подчеркнули, что сложный характер кривой блеска и смена периода у post-AGB-звезд могут быть обусловлены несколькими физическими процессами: пульсациями в атмосфере, несферичностью оболочки, неоднородностью поверхностного слоя звезды из-за наличия конвективных пятен. Для выборки далеко проэволюционировавших звезд сотрудниками группы В. П. Архиповой из ГАИШ МГУ проведены многоцветная фотометрия и спектральные наблюдения с умеренным спектральным разрешением. Эти данные позволили изучить переменность блеска, избытков цвета, оценить периоды переменности и выявить основные особенности спектров совокупности звезд на эволюционном пути от стадии AGB до планетарных туманностей. Опубликованные в течение трех десятилетий работы с результатами

этой группы зачастую служили для нас основанием для последующей спектроскопии ряда звезд с высоким разрешением на БТА (см., в частности, статьи Arkhipova et al., 2003, 2006, 2011, 2013).

По завершении миссии IRAS множество ИК-источников были отождествлены с далеко проэволюционировавшими звездами на стадиях AGB и post-AGB, что легло в основу выполненной нами программы детальной спектроскопии выборки этих объектов на 6-м телескопе БТА. Анализ наших спектральных данных нацелен прежде всего на определение фундаментальных параметров и особенностей химического состава звездных атмосфер. Впоследствии для избранных звезд программы с наиболее интересными особенностями спектров выполнялся спектральный мониторинг для поиска переменности специфических спектральных деталей и картины лучевых скоростей. Однако объекты с большими избытками ИК-потока обычно слабы в видимом диапазоне вследствие значительного околозвездного поглощения. Лишь небольшая выборка слабых в видимом диапазоне центральных звезд источников доступна на крупных телескопах для оптической спектроскопии с высоким спектральным разрешением. В нашем обзоре рассмотрим наблюдаемые особенности для следующих объектов:

IRAS z02229+6208 (далее IRAS z02229),
 IRAS 04296+3429 (IRAS 04296),
 IRAS 07134+1005 (IRAS 07134),
 IRAS 07430+1115 (IRAS 07430),
 IRAS 19500–1709 (IRAS 19500),
 IRAS 22223+4327 (IRAS 22223),
 IRAS 23304+6147 (IRAS 23304).

Многочисленные результаты, которые мы получили в ходе спектроскопии и спектрального мониторинга, суммированы в обзорах Klochkova (1997), Klochkova (2019a), Klochkova (2019b) и Klochkova et al. (2022b). В работе Klochkova (2014) приведены определенные нами параметры околозвездных оболочек, зачастую несферических и структурированных, в сочетании с данными радиоспектроскопии. По мере выполнения программы для ряда изучаемых объектов потребовалось определение или уточнение эволюционного статуса. Отличным примером служат результаты, полученные для сверхгиганта V1302 Aql в системе ИК-источника IRS+10420. Долгое время звезду относили к маломассивным сверхгигантам на стадии post-AGB, но последующие уточнения ее параметров (светимости и деталей химического состава атмосферы, Jones et al., 1993; Oudmaijer et al., 1996; Klochkova et al., 1997) позволили отнести V1302 Aql к самым массивным проэволюционировавшим звездам на стадии желтого гипергиганта вблизи высокотемпературной границы Желтого Войда (Klochkova et al.,

2016). Отметим предельно высокую светимость V1302 Aql, полученную Oudmaijer et al. (2022) на основе расстояний по данным Gaia DR3 (Brown et al., 2021). В списке многочисленных post-AGB-звезд, перечисленных в работе Oudmaijer et al. (2022), светимость V1302 Aql по крайней мере на 2–3 порядка выше этого параметра у иных G-сверхгигантов. Столь же значительно был изменен и статус звезды BD –11° 1178 в системе источника IRAS 05238–0626. За счет спектрального мониторинга высокого разрешения была обнаружена двойственность звезды (SB2); анализ совокупности данных не подтвердил принадлежность звезды к стадии post-AGB (Klochkova and Chentsov, 2008). В итоге Klochkova and Chentsov (2008) пришли к выводу о том, что BD –11° 1178 является молодой парой F-звезд до главной последовательности (ГП), и предположили ее членство в подгруппе 1c ассоциации Ori OB1.

Основная цель данного обзора — анализ поведения со временем спектральных особенностей и картины лучевых скоростей выборки одиночных C-rich-звезд — членов однородной подгруппы post-AGB-звезд с отделившейся оболочкой, с двугорбым распределением энергии (SED) в спектре и с атмосферами, обогащенными тяжелыми металлами s-процесса. Очевидно, что для поиска временных изменений спектра и поля скоростей для каждого объекта программы необходимо выполнить многократные наблюдения, разнесенные по датам. Здесь мы суммируем результаты, полученные и опубликованные для отдельных звезд ранее. Результаты спектроскопии C-rich звезд в системах источников IRAS 04296, IRAS 07134, IRAS 19500, IRAS 22223 и IRAS 23304 опубликованы в статьях Klochkova et al. (1999), Klochkova (1995), Klochkova (2013), Klochkova et al. (2010), Klochkova et al. (2000b) соответственно. Позже были опубликованы дополнительные результаты более детального исследования с использованием новых высококачественных спектров C-rich-звезд в системах IRAS 07134 (Klochkova et al., 2007) и IRAS 23304 (Klochkova et al., 2015).

Наряду с этими более изученными объектами здесь мы детальнее представляем результаты мониторинга мало исследованной звезды в системе IRAS 07430. Значительная часть данного обзора посвящена сопоставлению особенностей этой звезды с родственной ей звездой в ИК-источнике IRAS z02229. Родственность этой пары звезд провозглашена ранее авторами Reddy et al. (1999) на основании близких значений фундаментальных параметров, металличности и деталей химического состава их атмосфер. Проанализировав данные эшелле-спектроскопии высокого разрешения, полученные со спектрографом 2.7-м телескопа

обсерватории McDonald, Reddy et al. (1999) опубликовали для пары звезд в системах IRAS z02229 и IRAS 07430 фундаментальные параметры и детальный химический состав их атмосфер и заключили, что металличность звезд понижена: $[Fe/H]_{\odot} = -0.5$ при больших избытках углерода $[C/Fe]_{\odot} = +0.8$ и тяжелых металлов s-процесса $[s/Fe]_{\odot} = +1.4$. Эти особенности химического состава свидетельствуют о том, что обе звезды прошли эволюционную стадию AGB и третье перемешивание. Имеющиеся долговременные ряды фотометрических данных IRAS z02229 и IRAS 07430 в совокупности с данными ASAS позволили выявить долговременную переменность блеска обеих звезд с амплитудой $0^m.70$ и $0^m.29$ (Hrivnak et al., 2022).

Кинематические сведения для C-rich post-AGB-звезды, ассоциированной с ИК-источником IRAS z02229, были опубликованы Klochkova and Panchuk (2022). Из-за высокого избытка цвета этот объект относится к так называемым ERO C-rich-звездам, согласно типу звезд с мощными оболочками (Extremely Red Objects), введенному Groenewegen (2022). Как следует из сведений в таблице 1, полное поглощение у родственной звезды в системе источника IRAS 07430 существенно ниже. Это различие в значительной мере можно объяснить низким поглощением в межзвездной среде у близкого к нам объекта IRAS 07430 (параллакс $\pi = 0.3806$ мсд по данным Gaia DR3, Brown et al., 2021) и его расположением достаточно высоко над плоскостью Галактики. Для этой системы, как и для родственного объекта IRAS z02229, долгое время не было повторной регистрации оптического спектра с высоким разрешением. Проведение спектрального мониторинга звезды в системе IRAS 07430 затруднено ее слабым видимым блеском ($B = 13^m.9$, $V = 12^m.8$). Эти факторы послужили для нас стимулом к наблюдениям звезды со спектрографом 6-м телескопа, что и было выполнено в произвольные даты 2018–2024 гг.

В разделе 2 мы кратко описываем методы наблюдений и обработки данных. В разделе 3 суммируем наши результаты и сопоставляем их с опубликованными ранее для родственных объектов. В разделе 4 приводим обсуждение полученных результатов и основные выводы.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

Основная совокупность спектров C-rich-звезд в ходе выполнения программы получена с эшелле-спектрографом НЭС (Panchuk et al., 2017), стационарно расположенным в фокусе Нэсмита 6-м

Таблица 1. Основные сведения выборки C-rich post-AGB-звезд, ассоциированных с ИК-источниками

Параметр	Источники IRAS							Ссылки
	z02229	04296	07134	07430	19500	22223	23304	
π , mas	0.3806	0.2366	0.4538	3.0577	0.3992	0.3325	0.2366	Brown et al. (2021)
V , mag	12.1	14.2	8.2	12.8	8.7	9.7	13.1	Hrivnak et al. (2022)
ΔV , mag	0.70	0.12	0.24	0.29	0.16	0.26	0.22	Hrivnak et al. (2022)
T_{eff} , K	5952	7272	7485	5519	8239	6008	6276	Kamath et al. (2022)
$E(B - V)$	1.90	2.03	0.43	1.04	0.56	0.43	1.83	Kamath et al. (2022)

Таблица 2. Результаты измерений гелиоцентрической лучевой скорости V_r в спектрах в системе IRAS 07430. В скобках указано число спектральных деталей, измеренных для определения среднего значения V_r для каждой даты наблюдений

Дата	V_r , км с ⁻¹		
	Абсорбции	H α (ядро)	Полосы Свана
(1)	(2)	(3)	(4)
19–23.12.1996*	35 \pm 1		22 \pm 1 (23), 24 \pm 1 (12)
06.04.2018	36.6 \pm 0.14 (268)	40.5	21.4 \pm 0.6 (11)
11.04.2018	36.2 \pm 0.12 (380)	41.2	20.2 \pm 0.3 (28)
07.12.2019	37.7 \pm 0.16 (488)	43.8	20.0 \pm 0.2 (28)
27.03.2024	39.2 \pm 0.14 (194)	42.3	20.7 \pm 0.2 (55)

* — средние значения V_r для 1996 г. на основе данных Reddy et al. (1999).

телескопа БТА. Спектральное разрешение спектрографа НЭС составляет $\lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$, отношение сигнала к уровню шумов вдоль эшеллевого порядка в спектрах меняется примерно в полтора раза. Кроме того, сигнал значительно снижается в коротковолновой части эшелле-кадра из-за уменьшения потоков холодных звезд и значительного поглощения излучения звезды в ее оболочке. В настоящее время спектрограф НЭС оснащен ПЗС-матрицей форматом 4608 \times 2048 с размером элемента 0.0135 \times 0.0135 мм, шум считывания $1.8e^-$. Зарегистрированный спектральный диапазон на наших спектрах обычно составляет $\Delta\lambda = 470\text{--}778$ нм. Однако оптическая схема НЭС позволяет при необходимости изменять спектральный диапазон (см. примеры в публикациях Klochkova et al., 2007; Chentsov et al., 2011).

Для уменьшения световых потерь без потери спектрального разрешения спектрограф НЭС снабжен резателем изображения на три среза.

Моменты наблюдений звезды в системе IRAS 07430 и результаты измерений лучевых скоростей приведены в таблице 2.

Спектр одной из рассматриваемой выборки C-rich-звезд — в системе IRAS 04296 — и часть спектров IRAS 23304 из-за их слабого видимого блеска, соответственно $V = 14^m.2$ и $12^m.99$ (Hrivnak et al., 2022), были получены нами с эшелле-спектрографом умеренного разрешения

PFES (Panchuk et al., 1997) в первичном фокусе 6-м телескопа. Как следует из публикаций Klochkova et al. (1999) и Klochkova et al. (2000b), спектры этих двух звезд насыщены абсорбциями тяжелых металлов s -процесса, линия H α имеет типичный для post-AGB-звезд профиль с появлением эмиссии в отдельные моменты наблюдений. Главная особенность спектра обеих звезд — эмиссия в полосах Свана молекулы C₂ — показана на рис. 5 в статье Klochkova et al. (2000b) в сравнении с мощной эмиссией в спектре биполярной туманности Egg, ассоциированной с post-AGB-звездой V1610 Cyg. Слабая эмиссия в полосах Свана зарегистрирована и в спектре IRAS 22223 (см. рис. 5 в работе Klochkova, 2014). Отметим, что эти звезды с эмиссией в полосах Свана окружены структурированными туманностями.

Изучение переменности в спектрах холодных звезд (IRAS 04296, IRAS 07430 и других с видимым блеском $V \geq 13^m$) усложняют несколько факторов. Во-первых, видимый блеск такой звезды является предельным для спектроскопии высокого разрешения, поэтому при ухудшении качества изображения звезды даже за четыре часа накопления сигнала не удается достигнуть S/N , необходимого, в частности, для отождествления многочисленных узких вращательных деталей полос Свана (см. полосу (1;0) на рис. 1a). Во-вторых, имеется высокая степень блендирования из-за насыщенно-

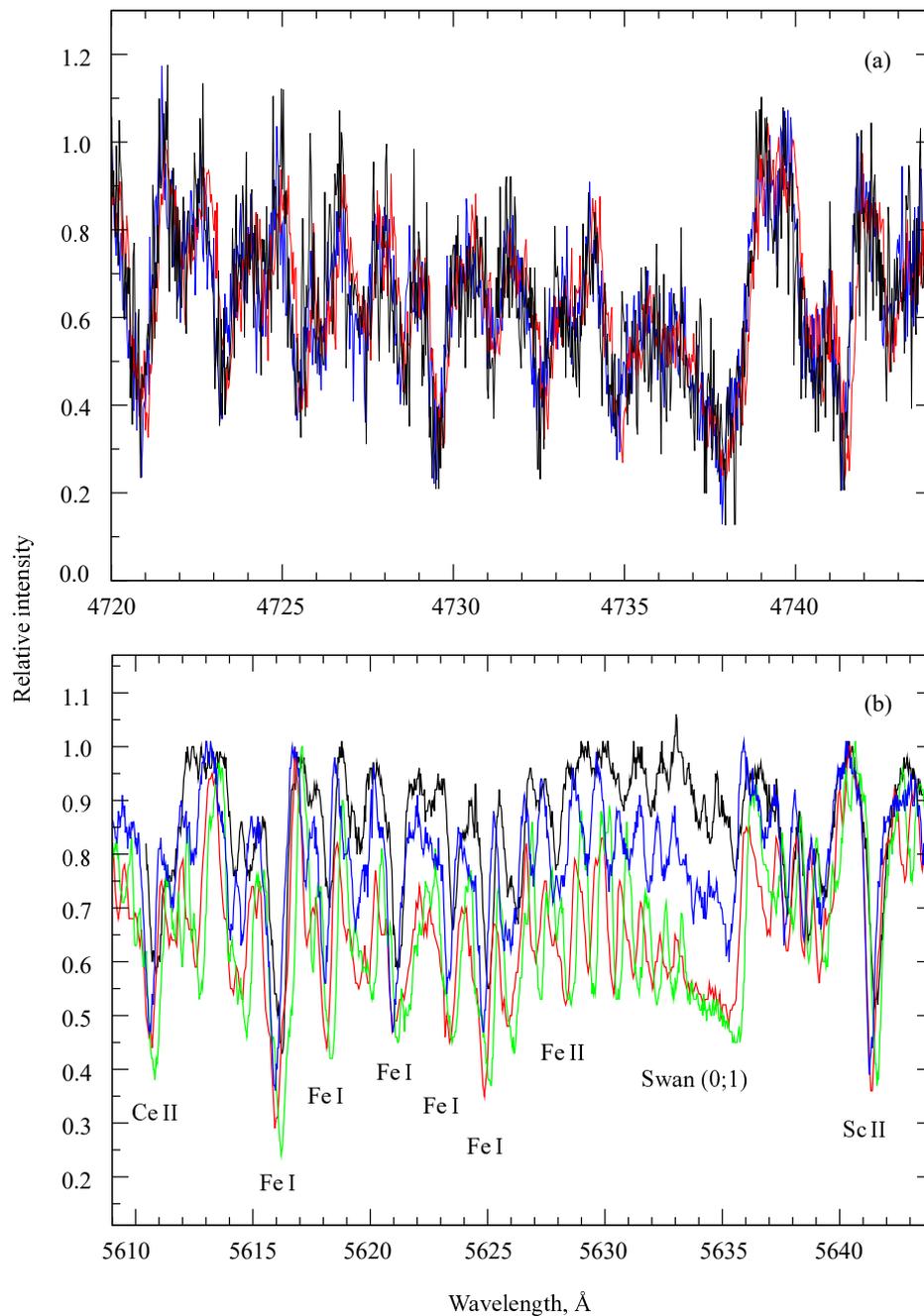


Рис. 1. На панели (а) представлен фрагмент спектра с полосой Свана (1;0) в спектрах IRAS 07430, полученных в разные ночи. На панели (б) — фрагмент спектра с полосой Свана (0;1) в спектрах IRAS z02229, полученных в разные ночи. Указано отождествление ряда абсорбций.

сти спектра сильными абсорбциями ионов, эквивалентные ширины которых зачастую сопоставимы с интенсивностью $H\alpha$ или превышают ее. Фрагменты спектра, представленные на рис. 2, хорошо это иллюстрируют. Отдельной проблемой является отсутствие надежных данных радиоспектроскопии, которые для звезд с оболочками позволяют зафиксировать системную скорость. К примеру, наблюдения Hrivnak and Biegling (2005), проведенные

для 12 post-AGB-звезд в линиях (4–3) и (2–1) распространенной в оболочках молекулы CO, не дали результата именно для IRAS 07430.

3. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Важнейшим этапом в исследовании post-AGB-звезд стала доступность результатов миссии Gaia и каталога Gaia DR3. Надежные параллаксы звезд,

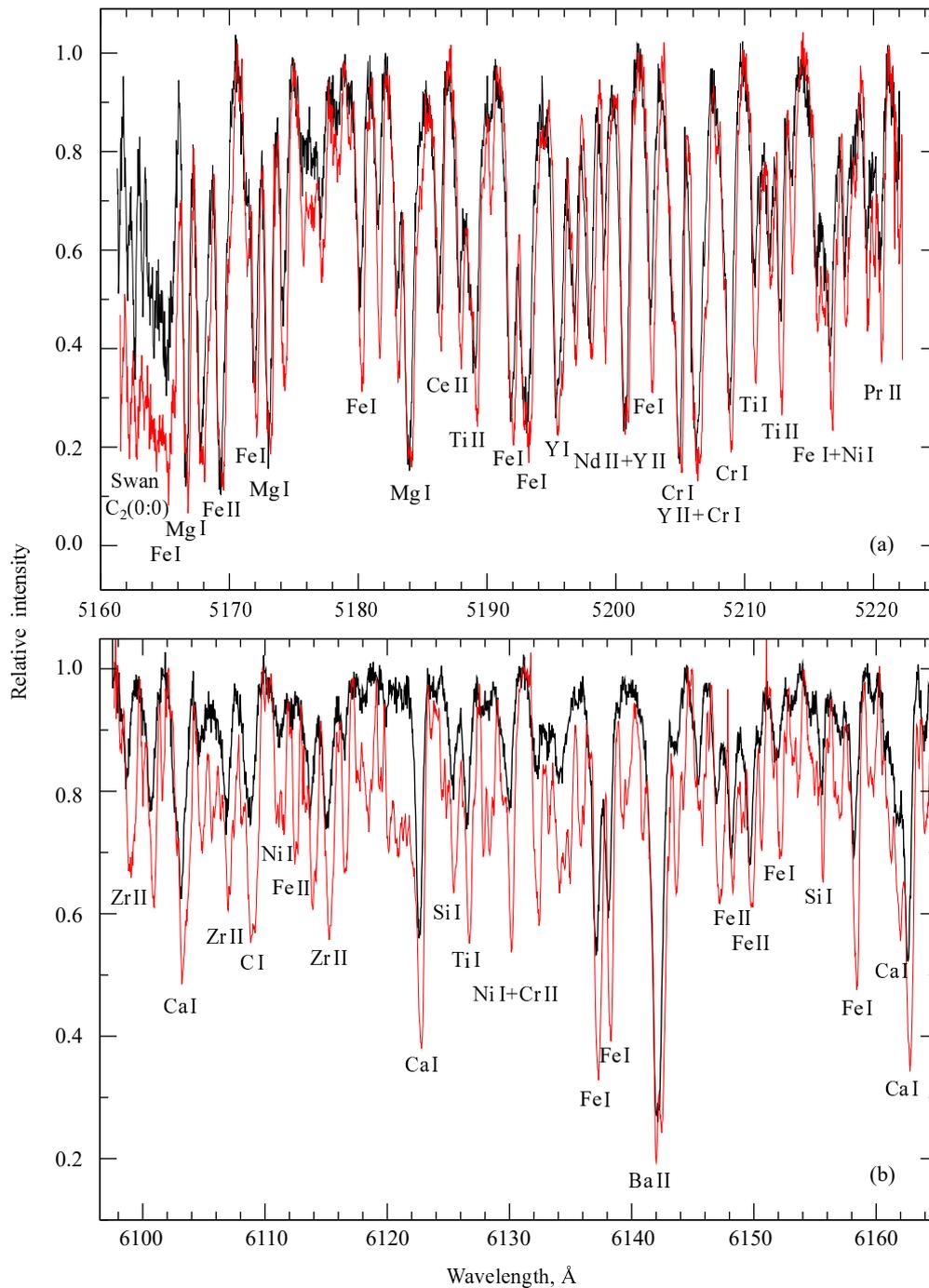


Рис. 2. Фрагменты спектров IRAS 07430 (черная линия) и IRAS z02229 (красная). По оси абсцисс — наблюдаемые длины волн. Указано отождествление основных абсорбций. На нижней панели видим расщепление ядра абсорбции Ba II λ 6141 в спектре IRAS z02229, отсутствующее в спектре IRAS 07430.

как правило, позволяют определить расстояния, светимости, исходные и текущие массы звезд. Kamath et al. (2022), базируясь на параллаксах каталога Gaia EDR3, провели моделирование SED для выборки одиночных C-rich-звезд на стадии post-AGB и получили для них совокупность фундаментальных параметров и набор

дополнительных сведений. Определенные таким образом фундаментальные параметры звезд в сочетании с особенностями химического состава атмосфер и оболочек проэволюционировавших звезд обеспечивают уточнение стадии эволюции и восстановление истории изменения химического состава. В частности, выше перечисленные

параметры получены Kamath et al. (2022) для всех членов выборки C-rich post-AGB-звезд, рассматриваемых нами в данном обзоре.

3.1. Светимость центральной звезды IRAS 07430

В работе Kamath et al. (2022) нам особенно интересен результат, касающийся статуса центральной звезды источника IRAS 07430, для которой авторами определена крайне низкая светимость: $L/L_{\odot} = 20$. При этом светимость родственной звезды в системе IRAS z02229 выше на два с лишним порядка: $L/L_{\odot} = 12959$ (Kamath et al., 2022). Любопытно, что при такой разнице светимости у обеих звезд практически одинаковая эквивалентная ширина W_{λ} триплета кислорода O I λ 7774, которая считается хорошим критерием абсолютной величины G-сверхгигантов. В спектрах IRAS z02229 и IRAS 07430 $W_{\lambda}(\text{O I } \lambda 7774) = 0.99$ и 0.91 \AA соответственно. Используя калибровочную зависимость « $M_V - W_{\lambda}(\text{O I})$ » (Kovtyukh et al., 2012), получаем для IRAS 07430 абсолютную величину $M_V \approx -3.3^m$ и логарифм светимости $\lg L/L_{\odot} \approx 3.19$ внутри диапазона значений для post-AGB-звезд. К примеру, согласно Kamath et al. (2022), звезда источника IRAS 22223 имеет близкую светимость: $L/L_{\odot} = 2163$.

Полученную оценку светимости для IRAS 07430, типичную для post-AGB-звезд, считаем важным результатом в анализе совокупности параметров системы из-за наличия, согласно Kamath et al. (2023), прочной связи светимости post-AGB-звезд с их массой и с исходной массой их предшественников на ГП. Kamath et al. (2023), детально моделируя этапы эволюции на стадиях AGB и post-AGB, установили нижний порог массы: звезды, испытывающие третье перемешивание, происходят от прародителей с массами в диапазоне $0.85 - 0.95 M_{\odot}$ в начале AGB. Судя по химическому составу атмосферы, центральная звезда в системе IRAS 07430 прошла этап третьего перемешивания — химический состав ее атмосферы аналогичен таковому у IRAS z02229 при близких параметрах моделей атмосфер. Таким образом, налицо парадоксально низкая светимость IRAS 07430, оценка которой выполнена в работе Kamath et al. (2022) по параллаксу Brown et al. (2021). Kamath et al. (2022) также указывают на низкое качество астрометрических данных для IRAS 07430, для которой значение параметра $RUWE = 21.8$ максимально среди звезд выборки, в то время как данные хорошего качества имеют $RUWE \leq 1.4$. Отметим также невозможность оценки светимости звезды в системе IRAS 19500, поскольку в спектре этой достаточно горячей звезды ($T_{\text{eff}} = 8239 \pm 250 \text{ K}$, согласно Kamath et al., 2022) интенсивность

триплета (его $W_{\lambda}(\text{O I } \lambda 7774) = 2.1 \text{ \AA}$) выходит за пределы калибровки Kovtyukh et al. (2012).

3.2. Особенности спектров и картины лучевых скоростей

3.2.1. IRAS z02229 и ближайшие аналоги

Начнем с особенностей спектра и поля скоростей одного из менее изученных объектов рассматриваемой выборки C-rich-звезд — IRAS z02229. Klochkova and Panchuk (2022) обнаружили в спектрах этой типичной C-rich-звезды несколько ожидаемых особенностей: переменность профиля H α , показанная на рис. 3, и расщепление профилей абсорбций металлов и ионов (K I, Na I, Y II, Zr II, Ba II, La II, Ce II, Nd II) с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня ($\chi_{\text{low}} \leq 1 \text{ eV}$). Их линии имеют асимметричный профиль или же расщеплены на две компоненты с отличающимися скоростями. Эффект расщепления для IRAS z02229 иллюстрирует рис. 4. Важным моментом является то, что при наличии явного расщепления абсорбций положение их длинноволновой компоненты совпадает с положением в спектре нерасщепленных абсорбций других металлов. Этот факт подтверждает ее формирование в атмосфере звезды. Положение коротковолновой компоненты близко к положению деталей полос системы Свана, что указывает на ее формирование в околозвездной среде. На рис. 1 в работе Začs and Puķītis (2023), показан фрагмент спектра высокого разрешения в интервале $6120 - 6150 \text{ \AA}$, содержащий и расщепленную абсорбцию Ba II λ 6141, что отмечено авторами статьи.

Все выявленные в атмосферах рассматриваемых C-rich post-AGB-звезд кинематические особенности собраны в таблице 3. Расщепление сильных абсорбций в спектрах V5112 Sgr выглядит сложнее. Как хорошо видно на рис. 4, их профили расщеплены не на две, а на три компоненты. Кроме того, наблюдается своеобразная переменность этих профилей со временем (см. рис. 3 в статье Klochkova, 2013). Как следует из сопоставления данных для имеющихся дат наблюдений, положение длинноволновых компонент расщепленных абсорбций меняется синхронно с положением симметричных абсорбций в спектрах звезды. Это означает, что длинноволновая компонента линий Ba II формируется в атмосфере звезды. Ширина обеих коротковолновых компонент, формирующихся в двухслойной оболочке, значительно меньше, чем у атмосферных, а их положения стационарны (см. рис. 3 в статье Klochkova, 2013), что подтверждает их формирование в околозвездной среде.

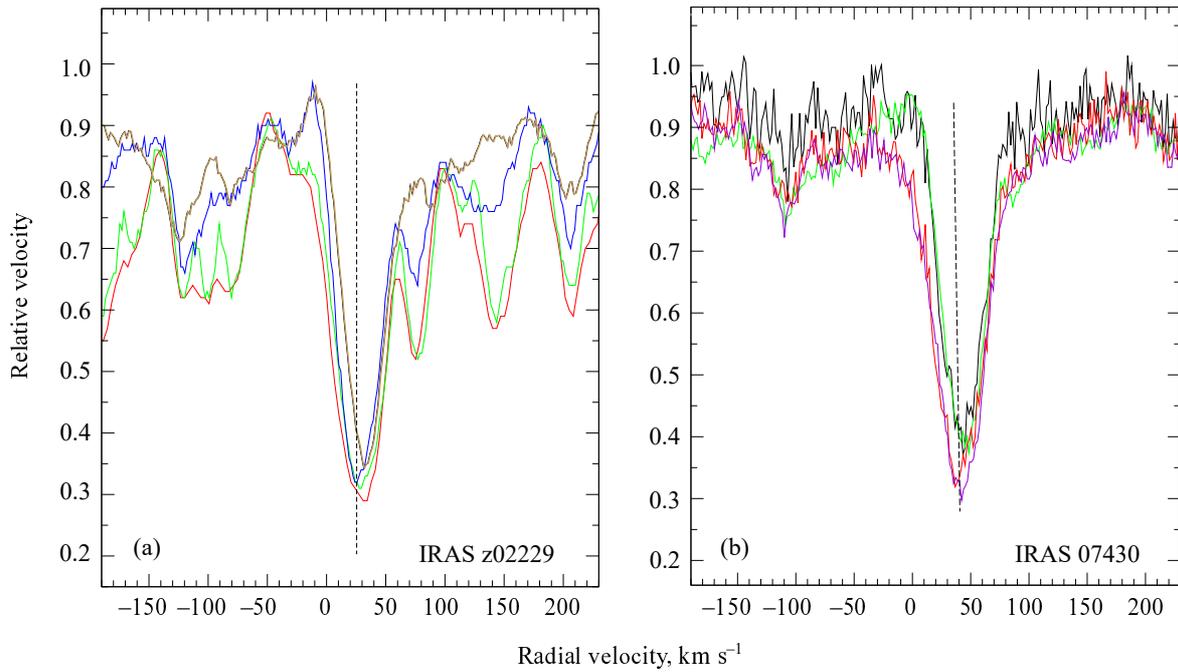


Рис. 3. Профиль $H\alpha$ в координатах «лучевая скорость – относительная интенсивность» в спектрах, полученных в разные даты. Положение штриховой вертикали соответствует значению системной скорости $V_{\text{sys}} = +24.3 \text{ км с}^{-1}$ для IRAS z02229 по данным радиоспектроскопии Hrivnak and Kwok (1999) и значению $V_{\text{sys}} = +37.0 \text{ км с}^{-1}$ для IRAS 07430.

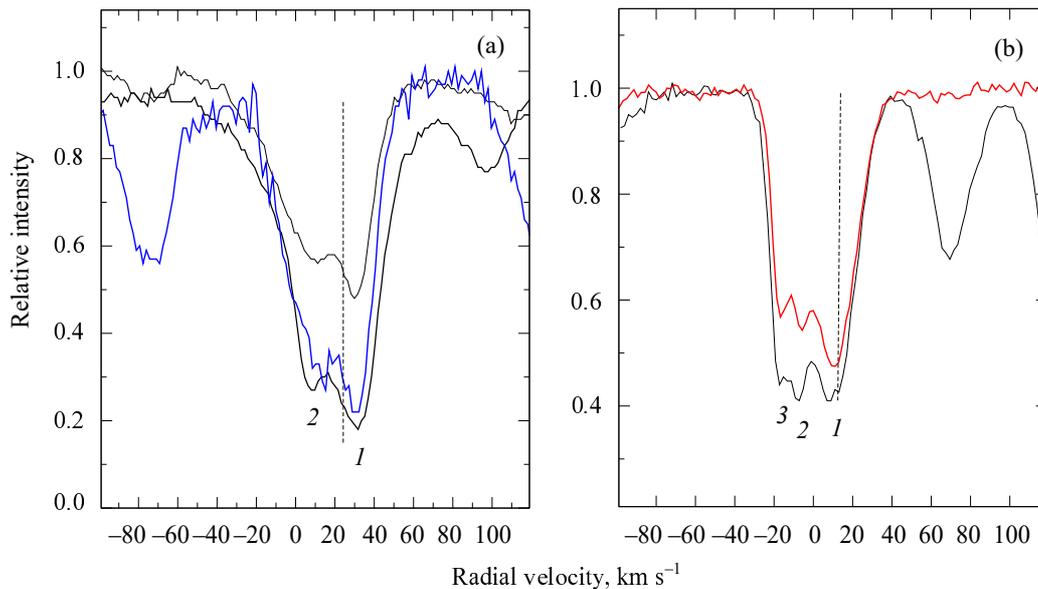


Рис. 4. Расщепленные профили абсорбций тяжелых металлов. Панель (a) — в спектре IRAS z02229: Ba II λ 6141 — жирная черная линия, Y II λ 5200 — синяя линия и La II λ 6390 — тонкая черная линия. Компонент 1 — атмосферная абсорбция, коротковолновый компонент 2 — оболочечный. Панель (b) — в спектре IRAS 19500: Ba II λ 4554 — черная линия, λ 4934 — красная. Положение штриховой вертикали указывает значение системной скорости.

Ранее подобное расщепление (либо асимметрию профиля в форме вытянутого коротковолнового крыла) сильных абсорбций было обнаружено в спектрах нескольких post-AGB-звезд с оболочками. Эти сведения приведены в табли-

це 3. В спектрах трех post-AGB-звезд с близкими параметрами в системах IRAS 07134 (Klochkova, 1995; Klochkova and Chentsov, 2007), IRAS 22223 (Klochkova et al., 2010) и IRAS 22272+5435 (далее — IRAS 22272) (Klochkova et al., 2009) явно-

Таблица 3. Кинематические особенности атмосфер C-rich post-AGB-звезд, ассоциированных с ИК-источниками. Прочерк означает отсутствие сведений

Параметр	Источники IRAS						
	z02229	04296	07134	07430	19500	22223	23304
L/L_{\odot}^*	12 959	10 009	5505	20	2163	7054	7712
$L(OI)/L_{\odot}^{**}$	1853	—	11690	1541	—	9720	8090
A_{V_r} , км с ⁻¹	1.4 ^a	—	2.7 ^b	0.8 ^d	2.5 ^e	1÷2 ^f	—
Split	yes ^a	—	asym ^c	no	yes ^e	asym ^f	yes ^g
Stratification	no	—	yes	no	—	yes ^f	—

* Значения светимости взяты из работы Kamath et al. (2022); ** данные авторов.

^a Klochkova and Panchuk (2022), ^b Barthès et al. (2000), ^c Klochkova and Chentsov (2007),

^d Klochkova et al. (2024), ^e Klochkova (2013), ^f Klochkova et al. (2010), ^g Klochkova et al. (2015).

го расщепления абсорбций нет, но зафиксирована асимметрия профилей сильных абсорбций.

Особый интерес в изучении особенностей кинематического состояния атмосферы вызывает post-AGB-звезда V5112 Sgr в системе ИК-источника IRAS 19500, которая также содержится в списке одиночных C-rich-звезд в работе Kamath et al. (2022). В работе Klochkova (2013) по шести спектрам, полученным на БТА+НЭС в различные даты 1996–2012 гг., найдена переменность лучевой скорости по симметричным абсорбциям металлов без признаков аномалий: среднее значение $V_r(\text{abs}) = 12.5 \text{ км с}^{-1}$ со стандартным отклонением 2.5 км с^{-1} .

В спектре этой звезды зарегистрирована существенная переменность профиля $H\alpha$. Рисунок 1 в статье Klochkova (2013) иллюстрирует изменения профиля $H\alpha$ от типа обратного P Cug до профиля с двумя эмиссионными пиками. Это изменение происходило параллельно со значительным изменением фотометрических характеристик звезды, зарегистрированным Hrivnak et al. (2010) в ходе многолетнего мониторинга.

Интересна также система ИК-источника IRAS 04296, которая, подобно IRAS z02229, обладает мощным избытком ИК-излучения. Центральная звезда в этой системе дальше продвинулась к стадии планетарной туманности, но в целом ее фундаментальные параметры, особенности химического состава атмосферы и распределение энергии в спектре этой системы (Klochkova et al., 1999) близки к таковым у системы IRAS z02229. Звезда в системе IRAS 04296 слаба для спектроскопии высокого разрешения ($V > 14^m$, $B > 16^m$), но ее оптический спектр (спектральный класс G8 Ia) подобен спектрам других звезд нашей выборки. В ИК-диапазоне спектр содержит все детали, присущие C-rich post-AGB-звездам, включая известную, но до сих пор не вполне отождествленную эмиссию на 21 мкм (Hrivnak et al., 2010). Объект является рекордсменом по интенсивности эмиссии

в полосах системы Свана (0;0) и (0;1) молекулы C_2 (Klochkova et al., 2023; 1999). Можно предположить, что большая удаленность этого объекта от AGB-фазы, вероятно, приводит к значительному расширению оболочки, что способствует формированию эмиссии в околосветных деталях.

3.2.2. Первые результаты спектрального мониторинга IRAS 07430

За последние годы удалось получить и проанализировать спектры центральной звезды источника IRAS 07430. Основные особенности оптического спектра IRAS 07430 иллюстрируют рис. 1–3. В каждом полученном нами спектре IRAS 07430 были измерены лучевые скорости V_r по положениям фотосферных абсорбций, вращательных деталей полос Свана и околосветных деталей Na I и K I. Результаты измерений представлены в таблице 2.

От даты к дате скорость по фотосферным абсорбциям меняется около среднего значения $V_r = 37.0 \text{ км с}^{-1}$ со стандартным отклонением $\Delta V_r \approx 0.8 \text{ км с}^{-1}$, что может быть проявлением малоамплитудных пульсаций в атмосфере звезды или наличием пятен на ее поверхности. Положение ядра $H\alpha$ изменяется в небольшом интервале: $40.5\text{--}43.8 \text{ км с}^{-1}$. Причиной переменности профиля этой линии может быть слабый ветер, за счет которого изменяется ее коротковолновое крыло (см. рис. 3b). Однако этот вывод требует новых наблюдений с высоким S/N .

По положениям вращательных компонент полос Свана (0;0), (1;0) и (2;0) молекулы C_2 , формирующихся в околосветной оболочке, определена средняя лучевая скорость $V_r(\text{Swan}) \approx 21 \text{ км с}^{-1}$ и получена скорость расширения оболочки $V_{\text{exp}} \approx 16 \text{ км с}^{-1}$, характерная для звезд данного типа. Результаты измерения V_r по положениям вращательных деталей полос Свана (см. таблицу 2) приводят к выводу об отсутствии переменности скорости в оболочке звезды. Стабильность полосы Свана (1;0) в спектрах IRAS 07430 иллюстрирует и

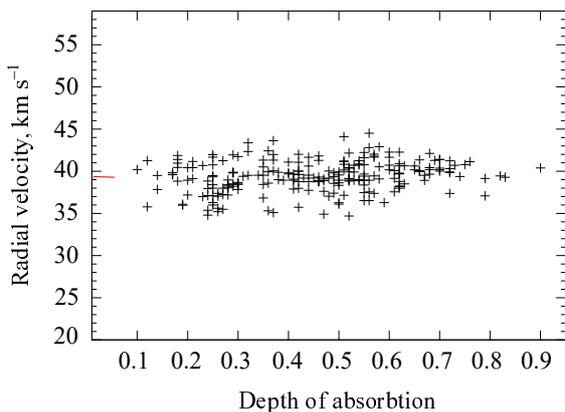


Рис. 5. Значения лучевой скорости $V_r(\text{abs})$, измеренные по абсорбциям в спектре IRAS 07430, полученном 27 мая 2024 г. Красной чертой указано среднее значение скорости $\langle V_r(\text{abs}) \rangle = +39.2 \text{ км с}^{-1}$ по совокупности абсорбций для этой даты.

верхняя панель на рис. 1а. При этом полоса Свана (0;1) в спектрах IRAS z02229, представленная на панели (b) того же рисунка, имеет явно переменную интенсивность. Несколько позже авторы Zacs and Puķītis (2023) по спектрам высокого разрешения продлили исследование переменности спектра IRAS z02229. В длинноволновой области спектра они также зафиксировали переменность деталей полос молекул CN и C_2 , формирующихся в околозвездной среде, и подтвердили пульсации звезды с периодом около 154 дней. Для звезды в системе IRAS z02229 полуамплитуда переменности скорости по фотосферным абсорбциям $\Delta V_r \approx 1.4 \text{ км с}^{-1}$ (Klochko and Panchuk, 2022), что выше этого параметра в системе IRAS 07430 ($\Delta V_r \approx 0.8 \text{ км с}^{-1}$). Таким образом, на основании имеющихся данных спектрального мониторинга сделан вывод о различии кинематического состояния двух родственных C-rich-звезд.

Дополнительным подтверждением стабильности атмосферы IRAS 07430 служит отсутствие в ее атмосфере стратификации лучевой скорости. Мы провели поиск и не обнаружили в спектрах IRAS 07430 зависимость значений лучевой скорости $V_r(\text{abs})$ от интенсивности абсорбций, найденную для IRAS z02229. Для иллюстрации на рис. 5 представлены данные измерений скорости по абсорбциям различной глубины в спектре звезды за 27 марта 2024 г. На отсутствие значимой стратификации лучевой скорости в атмосфере указывает независимость $V_r(\text{abs})$ от уровня формирования линий в атмосфере.

3.2.3. IRAS 22223 и IRAS 22272

Ранее по спектрам БТА+НЭС по измерениям положений слабых абсорбций была обнаружена переменность лучевой скорости с амплитудой

$\Delta V_r \approx 1\text{--}2 \text{ км с}^{-1}$ для post-AGB-звезды V448 Lac в системе IRAS 22223 (Klochko et al., 2010). Эта звезда является полноправным членом подгруппы post-AGB-звезд с отделившейся оболочкой, двугорбым распределением энергии (SED) в спектре и с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами. Klochko et al. (2010) зафиксировали в спектрах этой звезды многочисленные проявления нестабильности: переменность профиля $\text{H}\alpha$, асимметрию и переменность профилей сильных абсорбций металлов с низким потенциалом возбуждения (прежде всего это переменные профили абсорбций Ba II), а также эмиссию в полосе Свана (0;1) $\lambda 5635$. Переменность профилей Ba II обусловлена появлением эмиссионной компоненты, формирующейся в оболочке, причем в эти же моменты эмиссия фиксируется и в полосе Свана (0;1) $\lambda 5635$ молекулы C_2 . Кроме того, выявлены дифференциальные сдвиги в картине V_r — различие лучевых скоростей по абсорбциям разной глубины достигает значений от 0 до 8 км с^{-1} в различные ночи наблюдений (см. рис. 8 в статье Klochko et al., 2010).

Как следует из публикации Kamath et al. (2022), в группу одиночных C-rich post-AGB звезд входит и источник IRAS 22272. Основные параметры HD 235858, центральной звезды этой системы, близки к средним по выборке значениям. Видимая величина $9^m 5$, незначительная удаленность и невысокое поглощение обеспечивают доступность этой звезды для спектроскопии высокого разрешения. Для этой звезды были опубликованы результаты расчета химического состава атмосферы (Zacs et al., 1995) и особенности картины лучевых скоростей в ее атмосфере и околозвездной оболочке (Puķītis et al., 2023). По спектрам в длинноволновом диапазоне источника IRAS 22272 Puķītis et al. (2023) обнаружили переменность в полосах углеродосодержащих молекул CN и C_2 . В отдельные фазы наблюдений в полосах этих молекул появляются эмиссии с интенсивностью около 10% выше континуума и с переменным положением. Сочетание этих особенностей можно объяснить наличием несферической околозвездной оболочки, образовавшейся за счет суммирования потоков звездного вещества из-за ветра с различным темпом на стадиях AGB и post-AGB (Ueta et al., 2001). Ранее эмиссия в полосах Свана молекулы C_2 была зарегистрирована в оптических спектрах ИК-источников: IRAS 04296 (Klochko et al., 1999), IRAS 08005–2356 (Klochko and Chentsov, 2004), IRAS 22223 (Klochko et al., 2010), IRAS 23304 (Klochko et al., 2015). Изображения этих ИК-источников, полученные с помощью космического телескопа HST, имеют асимметричные и, как правило, структурированные обо-

лочки (Ueta et al., 2000). Максимальная эффективность эмиссии в полосах Свана зарегистрирована в спектре туманности RAFG 2688 (Klochkova et al., 2000a) с биполярной структурой оболочки.

3.2.4. HD 56126 — канонический объект на стадии post-AGB

Кинематические особенности достаточно яркой звезды HD 56126 в системе IRAS 07134 были детально изучены по большому объему спектров высокого разрешения Barthès et al. (2000), которые нашли пульсации с полуамплитудой 2.7 км с^{-1} . Позже мониторинг этой звезды был продолжен Klochkova and Chentsov (2007), которые по данным спектроскопии на БТА с 1993 по 2005 г. выявили разнообразие профилей $H\alpha$ типа P Cyg, меняющихся от прямого P Cyg на обратный (см. рис. 3 в статье Klochkova and Chentsov, 2007). Полуамплитуда вариаций скорости по слабым абсорбциям (с остаточной интенсивностью, близкой к уровню локального континуума) равна $2\text{--}3 \text{ км с}^{-1}$, подтверждена стабильностью скорости расширения околозвездной оболочки HD 56126, фиксируемой по линиям C_2 и NaI . Кроме того, обнаружено различное поведение скорости по линиям разной степени возбуждения, формирование которых идет на различающихся глубинах в атмосфере звезды. Рисунок 7 в статье Klochkova and Chentsov (2007) демонстрирует оба эффекта: проявление пульсаций и стратификацию лучевой скорости по абсорбциям разной интенсивности.

Переменность комплексного профиля $H\alpha$ в спектре достаточно яркой post-AGB-звезды HD 56126, отождествляемой с ИК-источником IRAS 07134, изучалась многими авторами. Большая коллекция профилей $H\alpha$ в спектре IRAS 07134 на основе восьми лет наблюдений опубликована Lèbre et al. (1996), Barthès et al. (2000), которые сделали вывод о значительной и сложной переменности в абсорбционной части профиля $H\alpha$, обусловленной прохождением волн в атмосфере звезды.

В последние годы со спектрографом НЭС получено несколько новых спектров IRAS 07134, в целом совокупность деталей согласуется с прежними наблюдениями, подробно представленными в работах Barthès et al. (2000); Klochkova et al. (2007). При этом обращает на себя внимание существенное изменение профиля $H\alpha$ в спектрах трех дат в последние годы наших наблюдений, что хорошо видно на рис. 6. На этом рисунке указана системная скорость $V_{\text{sys}} = 86 \text{ км с}^{-1}$, определенная для IRAS 07134 по данным радоспектроскопии в полосах молекулы CO Bujarrabal et al. (1992). Подчеркнем, что впервые за несколько десятилетий наблюдений этой звезды лишь в спектре 2024 г.

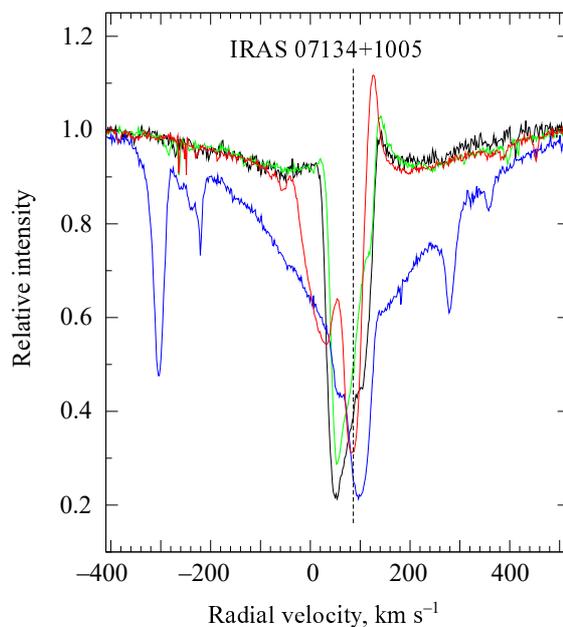


Рис. 6. Профили $H\alpha$ в спектрах, полученных на БТА со спектрографом НЭС: 5 мая 2007 г. — черная линия, 11 октября 2013 г. — зеленая, 30 марта 2024 г. — красная. Синим цветом нанесен профиль $H\beta$ в спектре за 30 марта 2024 г. Положение штриховой вертикали соответствует системной скорости $V_{\text{sys}} = 86 \text{ км с}^{-1}$ (Bujarrabal et al., 1992).

зарегистрирован столь необычный профиль $H\alpha$. Профиль содержит, наряду с обычными для post-AGB-звезд широкими абсорбционными крыльями, два эмиссионных «плеча» и абсорбционное ядро, расщепленное на две компоненты. Положение длинноволновой компоненты согласуется с системной скоростью, а коротковолновая компонента смещена на 60 км с^{-1} . Barthès et al. (2000) отметили, что наличие структуры в абсорбционном ядре $H\alpha$ может быть вызвано присутствием слоев с различной скоростью, поскольку не исключено сосуществование нескольких ударных волн в области формирования линий водорода. Подчеркнем, что профиль $H\beta$ в этом же спектре не содержит значительных особенностей.

3.2.5. IRAS 20000+3239

В заключение отметим, что в группу одиночных C-rich-звезд входит и еще одна, довольно слабая ($V = 13^m 4$) в видимом диапазоне для спектроскопии на БТА+НЭС звезда в системе IRAS 20000+3239. Klochkova and Kirper (2006), имея лишь один спектр этой звезды, полученный со спектрографом PFES, выявили наличие полос молекул C_2 и CN , определили параметры модели, рассчитали низкую металличность $[Fe/H]_{\odot} = -1.4$ и детальный химический состав атмосферы, типичный для C-rich post-AGB-звезд. До настоящего времени повторные наблюдения не выполнялись,

сведений о переменности поля скоростей, к сожалению, нет. Для этой задачи необходим спектральный мониторинг звезд в системах IRAS 04296 и IRAS 20000+3239 с высоким разрешением.

3.2.6. Абсорбция вблизи λ 6708

Вкратце затронем важный для всей выборки C-rich post-AGB-звезд вопрос, связанный с отождествлением в их спектрах абсорбции вблизи λ 6708, которую зачастую приписывали Li I. Вследствие важности проблемы происхождения лития в картине химической эволюции Галактики, исследователи всегда уделяют особое внимание поиску этой детали в спектрах изучаемых звезд. Например, Reddy et al. (1999), Klochkova et al. (2008) отождествили эту абсорбцию в спектрах post-AGB-звезд с линией Li I λ 6707.76 и сделали вывод об избытке лития в атмосферах этих звезд. Однако Reyniers et al. (2002) показали, что в спектрах C-rich post-AGB-звезд абсорбцию на λ 6707.8 следует отождествлять с абсорбцией Ce II λ 6708.099. Reddy et al. (1999) также отметили ненадежность определения содержания лития в атмосферах обеих исследованных звезд на основе интенсивности абсорбции около λ 6708 из-за возможного блендирования линиями CN и Ce II. В наших спектрах исследованных C-rich post-AGB-звезд мы надежно отождествили эту абсорбцию с линией Ce II λ 6708.099, поскольку в высококачественных спектрах этих звезд измерения лучевой скорости по положению спорной детали λ 6708 отлично согласуются со средним значением V_r по многочисленным абсорбциям металлов.

3.3. О межзвездных деталях в спектрах C-rich-звезд

Имея высококачественные наблюдения, в спектрах изучаемых post-AGB-звезд мы отождествляли диффузные межзвездные полосы DIBs и измеряли их эквивалентные ширины W_λ . Эти сведения позволяют оценить с использованием опубликованных калибровок избыток цвета $E(B - V)$ и межзвездное поглощение A_V , значение которого необходимо в задаче уточнения удаленности и светимости звезды. Эта процедура особенно важна для звезды в системе IRAS 07430 в связи с парадоксально низкой ее светимостью (Kamath et al., 2022). Для начала рассмотрим межзвездные компоненты профилей D-линий Na I в спектре IRAS 07430. Профиль одной из D-линий дублета Na I представлен на рис. 7а совместно с профилем линии KI λ 7699. Для уточнения картины скоростей в системе IRAS 07430 сопоставим представленные на рис. 7 многокомпонентные профили линии D2 Na I λ 5890 в спектрах IRAS 07430 и удаленной post-AGB-звезды IRAS 07134, имеющей близкие к

IRAS 07430 галактические координаты. Как следует из публикации Klochkova et al. (2007), положения трех коротковолновых компонент 1–3 в спектрах IRAS 07134 не изменяются со временем в пределах точности измерений. Эта стабильность подтверждает их формирование в межзвездной и околозвездной среде. Положение глубокой компоненты 4 согласуется с положением полос Свана, что указывает на ее формирование в околозвездной оболочке. Самая длинноволновая компонента 5 является фотосферной: ее поведение со временем соответствует поведению других фотосферных абсорбций в таблице 3 в статье Klochkova et al. (2007).

В спектрах IRAS 07430 мы также провели тщательный поиск диффузных межзвездных деталей (DIBs). Однако надежно отождествлена лишь интенсивная межзвездная полоса с широкими крыльями на λ 6281. Положение ее ядра ($V_r \approx 23 \text{ км с}^{-1}$) соответствует скорости, близкой к скорости по положению межзвездной линии KI λ 7699. Но из-за блендирования и зашумленности спектра наличие других известных DIBs ожидаемо слабых в спектрах близкой к нам звезды, к тому же значительно удаленной от галактической плоскости (галактическая долгота IRAS 07430 $b > 17^\circ$), не подтверждено.

4. ВЫВОДЫ

В целом можно сделать вывод о нестабильном кинематическом состоянии истекающих атмосфер одиночных C-rich post-AGB-звезд. Общими для них эффектами могут быть переменность картины лучевых скоростей из-за пульсаций, переменность комплексных профилей $H\alpha$, появление эмиссии в полосах молекулярных полос, расщепление абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня, а также стратификация скорости в атмосфере центральной звезды. Подчеркнем, что звезды изученной выборки имеют эффективные температуры в интервале $\lg T_{\text{eff}} \approx 3.7\text{--}3.9$, что хорошо согласуется с температурами post-AGB-звезд с возможной фотометрической нестабильностью $\Delta V > 0^{\text{m}}5$, обусловленной радиальными пульсациями из работы Aikawa (2010). Примерно в этом же диапазоне температур выполнено теоретическое моделирование радиальных пульсаций в атмосферах post-AGB звезд Ю. А. Фадеевым (Fadeyev, 2019), проведенное с учетом конвекции.

В спектрах C-rich-звезд разной светимости (а следовательно, имеющих различающиеся исходные массы), и в различной мере удалившихся от стадии AGB, наблюдаются разные сочетания перечисленных эффектов. К примеру, в случае IRAS 07430 отсутствуют ожидаемые особенности

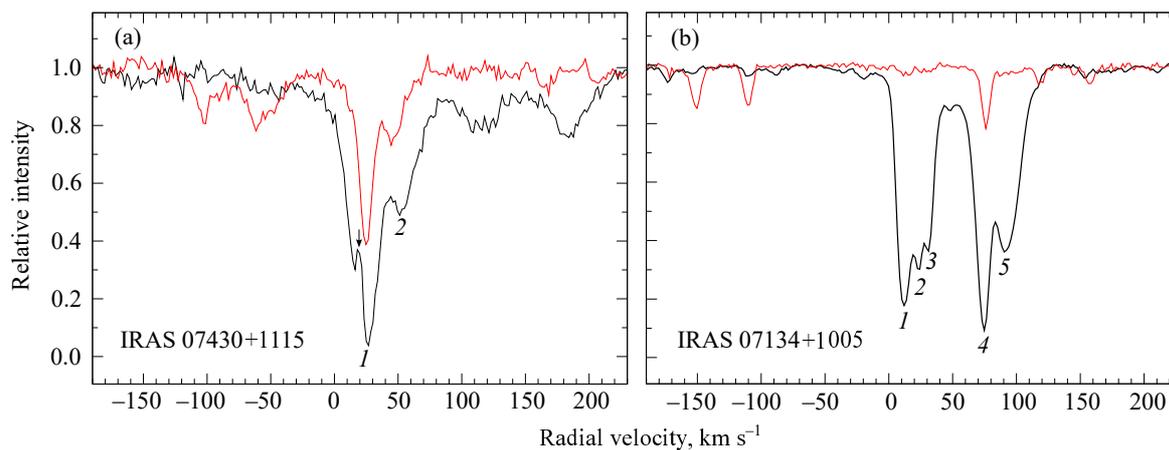


Рис. 7. Профили абсорбций Na I λ 5890 (черная линия) и K I λ 7699 (красная линия) в координатах «лучевая скорость — относительная интенсивность»: панель (a) — в спектре IRAS 07430 (стрелкой указано положение теллурической эмиссии); панель (b) — профили этих же линий в спектре удаленной post-AGB-звезды IRAS 07134.

спектра: стратификация лучевой скорости в атмосфере звезды, пекулярность профиля $H\alpha$ и расщепление сильных абсорбций тяжелых металлов, найденные нами в спектрах ближайшей родственной звезды в системе IRAS z02229. При этом в спектрах HD 56126 в системе IRAS 07134 зарегистрированы максимальная амплитуда пульсаций, дифференциальные сдвиги лучевой скорости в атмосфере, асимметричные профили абсорбций и значительная переменность комплексного профиля $H\alpha$. В спектре IRAS 07134 за 30 марта 2024 г. зафиксирован аномальный профиль $H\alpha$, абсорбционное ядро которого расщеплено на две компоненты. Коротковолновая компонента абсорбции $H\alpha$ смещена на 60 km s^{-1} относительно системной скорости.

Сопоставление параметра переменности блеска ΔV из таблицы 1 и амплитуды пульсаций A_{V_r} из таблицы 3 указывает на отсутствие корреляции этих параметров.

Как следует из сведений в таблице 3, максимальная амплитуда A_{V_r} зарегистрирована у звезд в системах IRAS 07134 и IRAS 19500. При этом именно эти две звезды, имеющие в выборке максимальные значения температуры $T_{\text{eff}} \geq 7500 \text{ K}$, максимально отошли от асимптотической ветви гигантов. Полученные сведения об амплитуде пульсаций позволяют сделать предварительный вывод о влиянии массы звезды и степени ее продвижения от AGB к стадии PN на уровень неустойчивости атмосферы.

Получен неожиданный и требующий объяснения результат: при огромной разнице в светимости звезд в системах IRAS z02229 и IRAS 07430 эквивалентная ширина W_λ триплета кислорода O I λ 7774 в их спектрах практически одинакова — 0.99 и 0.91 Å соответственно. Парадокс в оценках

светимости центральной звезды ИК-источника IRAS 07430 может быть обусловлен неопределенностью параллакса у близких холодных звезд с протяженными пылевыми оболочками (Andriantsaralaza et al., 2022).

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты». В исследовании использованы базы астрономических данных SIMBAD, VALD, SAO/NASA ADS, ASAS-SN и Gaia DR3.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа по обработке спектральных данных и анализу результатов выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Aikawa, *Astron. and Astrophys.* **514**, id. A45 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/200912991
2. M. Andriantsaralaza, S. Ramstedt, W. H. T. Vlemmings, and E. De Beck, *Astron. and Astrophys.* **667**, id. A74 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202243670

3. V. P. Arkhipova, M. A. Burlak, V. F. Esipov, et al., *Astronomy Letters* **39** (9), 619 (2013). DOI:10.1134/S1063773713090016
4. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, and G. V. Komissarova, *Astronomy Letters* **37** (9), 635 (2011). DOI:10.1134/S0320010811090014
5. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, R. I. Noskova, et al., *Astronomy Letters* **25** (1), 25 (1999).
6. V. P. Arkhipova, V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, et al., *Astronomy Letters* **32** (10), 661 (2006). DOI:10.1134/S1063773706100021
7. V. P. Arkhipova, R. I. Noskova, N. P. Ikonnikova, and G. V. Komissarova, *Astronomy Letters* **29**, 480 (2003). DOI:10.1134/1.1589865
8. D. Barthès, A. Lèbre, D. Gillet, and N. Mauron, *Astron. and Astrophys.* **359**, 168 (2000).
9. T. Blöcker, *Astron. and Astrophys.* **299**, 755 (1995a).
10. T. Blöcker, *Astron. and Astrophys.* **297**, 727 (1995b).
11. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039657
12. V. Bujarrabal, J. Alcolea, and P. Planesas, *Astron. and Astrophys.* **257**, 701 (1992).
13. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, T. Kipper, et al., *Astrophysical Bulletin* **66** (4), 466 (2011). DOI:10.1134/S1990341311040092
14. S. Cristallo, L. Piersanti, O. Straniero, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **197** (2), article id. 17 (2011). DOI:10.1088/0067-0049/197/2/17
15. M. Di Criscienzo, P. Ventura, D. A. García-Hernández, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462** (1), 395 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw1685
16. Yu. A. Fadeyev, *Astronomy Letters* **45** (8), 521 (2019). DOI:10.1134/S1063773719080024
17. M. A. T. Groenewegen, *Astron. and Astrophys.* **659**, id. A145 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142648
18. F. Herwig, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43** (1), 435 (2005). DOI:10.1146/annurev.astro.43.072103.150600
19. S. Höfner and H. Olofsson, *Astron. Astrophys. Rev.* **26** (1), article id. 1 (2018). DOI:10.1007/s00159-017-0106-5
20. B. J. Hrivnak and J. H. Biegging, *Astrophys. J.* **624** (1), 331 (2005). DOI:10.1086/428894
21. B. J. Hrivnak and S. Kwok, *Astrophys. J.* **513** (2), 869 (1999). DOI:10.1086/306873
22. B. J. Hrivnak, W. Lu, W. C. Bakke, and P. J. Grimm, *Astrophys. J.* **939** (1), id. 32 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac938a
23. B. J. Hrivnak, W. Lu, R. E. Maupin, and B. D. Spitzbart, *Astrophys. J.* **709** (2), 1042 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/709/2/1042
24. T. J. Jones, R. M. Humphreys, R. D. Gehrz, et al., *Astrophys. J.* **411**, 323 (1993). DOI:10.1086/172832
25. D. Kamath, F. Dell’Aglì, P. Ventura, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **519** (2), 2169 (2023). DOI:10.1093/mnras/stac3366
26. D. Kamath, H. Van Winckel, P. Ventura, et al., *Astrophys. J.* **927** (1), id. L13 (2022). DOI:10.3847/2041-8213/ac5686
27. V. Klochkova, G. Zhuklevich, and V. Panchuk, in *Proc. All-Russian Conf. on Modern Astronomy: from the Early Universe to Exoplanets and Black Holes (VAK-2024)*, *Nizhny Arkhyz, Russia, 2024*, Ed. by Yu. Balega, A. Cherepashchuk, et al. (RIOR, Moscow, 2024), p. 349. DOI:10.26119/VAK2024.064
28. V. G. Klochkova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **272** (4), 710 (1995). DOI:10.1093/mnras/272.4.710
29. V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 5 (1997).
30. V. G. Klochkova, *Astronomy Letters* **39** (11), 765 (2013). DOI:10.1134/S1063773713110054
31. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 279 (2014). DOI:10.1134/S1990341314030031
32. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **74** (2), 140 (2019a). DOI:10.1134/S1990341319020032
33. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 475 (2019b). DOI:10.1134/S1990341319040138
34. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **48** (4), 301 (2004). DOI:10.1134/1.1704675
35. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **63** (3), 272 (2008). DOI:10.1134/S1990341308030073
36. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, A. S. Miroshnichenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459** (4), 4183 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw902
37. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **292** (1), 19 (1997). DOI:10.1093/mnras/292.1.19
38. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **63** (2), 112 (2008). DOI:10.1134/S199034130802003X
39. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **69** (4), 439 (2014). DOI:10.1134/S1990341314040063
40. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavganskaya, and M. V. Shapovalov, *Astrophysical Bulletin* **62** (2), 162 (2007). DOI:10.1134/S199034130702006X
41. V. G. Klochkova and Y. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **51** (12), 994 (2007). DOI:10.1134/S1063772907120049
42. V. G. Klochkova and T. Kipper, *Baltic Astronomy* **15**, 395 (2006).
43. V. G. Klochkova, A. S. Miroshnichenko, V. E. Panchuk, et al., *Astronomy Reports* **66** (5), 429 (2022a). DOI:10.1134/S1063772922060051
44. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 292 (2022). DOI:10.1134/S1990341322030063
45. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavganskaya, *Astrophysical Bulletin* **64** (2), 155 (2009). DOI:10.1134/S1990341309020047
46. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavganskaya, *Astronomy Reports* **54** (3), 234 (2010). DOI:10.1134/S1063772910030054

47. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavolzhanskaya, *Astronomy Letters* **41** (1-2), 14 (2015). DOI:10.1134/S1063773715020024
48. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, *Astrophysical Bulletin* **77** (1), 84 (2022b). DOI:10.1134/S1990341322010047
49. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 412 (2023). DOI:10.1134/S1990341323700128
50. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 439 (2000a). DOI:10.1134/1.20412
51. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 88 (2000b). DOI:10.1134/1.20372
52. V. G. Klochkova, R. Szczerba, V. E. Panchuk, and K. Volk, *Astron. and Astrophys.* **345**, 905 (1999). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/9904137
53. C. S. Kochanek, B. J. Shappee, K. Z. Stanek, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **129** (980), 104502 (2017). DOI:10.1088/1538-3873/aa80d9
54. V. V. Kovtyukh, N. I. Gorlova, and S. I. Belik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423** (4), 3268 (2012). DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.21117.x
55. A. Lèbre, N. Mauron, D. Gillet, and D. Barthès, *Astron. and Astrophys.* **310**, 923 (1996).
56. N. Liu, R. Gallino, S. Cristallo, et al., *Astrophys. J.* **865** (2), article id. 112 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aad9f3
57. M. M. Miller Bertolami, *Astron. and Astrophys.* **588**, id. A25 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201526577
58. R. D. Oudmaijer, M. A. T. Groenewegen, H. E. Matthews, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **280** (4), 1062 (1996). DOI:10.1093/mnras/280.4.1062
59. R. D. Oudmaijer, E. R. M. Jones, and M. Vioque, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **516** (1), L61 (2022). DOI:10.1093/mnrasl/slac088
60. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61** (9), 820 (2017). DOI:10.1134/S1063772917080091
61. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1997).
62. K. Puķītis, L. Začs, and J. Sperauskas, *Astrophys. J.* **948** (1), id. 70 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/acc52b
63. B. E. Reddy, E. J. Bakker, and B. J. Hrivnak, *Astrophys. J.* **524** (2), 831 (1999). DOI:10.1086/307858
64. M. Reyniers, H. Van Winckel, E. Biémont, and P. Quinet, *Astron. and Astrophys.* **395**, L35 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20021502
65. T. Ueta, M. Meixner, and M. Bobrowsky, *Astrophys. J.* **528** (2), 861 (2000). DOI:10.1086/308208
66. T. Ueta, M. Meixner, P. M. Hinz, et al., *Astrophys. J.* **557** (2), 831 (2001). DOI:10.1086/322259
67. L. Zacs, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **275** (3), 764 (1995). DOI:10.1093/mnras/275.3.764
68. L. Začs and K. Puķītis, *Astrophys. J.* **952** (1), id. 49 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/acdcfe

Instabilities of the Kinematic State of the Atmospheres of Single C-Rich Post-AGB Stars

V. G. Klochkova¹, V. E. Panchuk¹, N. S. Tavolzhanskaya¹, and M. V. Yushkin¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

To search for and study the instabilities in the atmospheres of selected post-AGB stars, we have performed a long-term high-resolution spectroscopy ($R \geq 60\,000$) with the NES spectrograph of the 6-m BTA telescope. Low-amplitude pulsations, splitting and/or asymmetry of the absorption profiles with a low excitation potential (mainly absorptions of s -process metals), as well as variability of a complex H_α profile have been registered in the optical spectra of single stars associated with the IR sources IRAS z02229+6208, IRAS 04296+3429, IRAS 07134+1005, IRAS 07430+1115, IRAS 19500–1709, IRAS 22223+4327 and IRAS 23304+6147 that had previously undergone the third mixing. The maximum pulsation amplitude A_{V_r} was detected for the stars in the IRAS 07134+1005 and IRAS 19500–1709 systems, which have the maximum temperatures among the stars in the studied sample. Stratification of radial velocity in the atmosphere was found for two stars in the sample. The luminosity of the studied stars was estimated based on the intensity of the IR oxygen triplet O I λ 7774. Moreover, a luminosity of $\log L/L_\odot \approx 3.1$ was obtained for the star in the IRAS 07430+1115 system within the range of typical post-AGB star luminosity values, which eliminates the paradox of the luminosity and the initial mass of this object.

Keywords: *stars: evolution—stars: post-AGB stars—stars: atmospheres—stars: circumstellar envelopes—techniques: spectroscopic*