

УДК 524.354; 524.3-852: 520.84

ДЕТАЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ POST-AGB-СВЕРХГИГАНТА GSC 04050–02366 В СИСТЕМЕ ИК-ИСТОЧНИКА IRAS Z02229+6208

© 2022 В. Г. Клочкова^{1*}, В. Е. Панчук¹¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 13 апреля 2022 года; после доработки 15 мая 2022 года; принята к публикации 15 мая 2022 года

В оптических спектрах холодного post-AGB сверхгиганта GSC 04050–02366, полученных на 6-м телескопе БТА с разрешением $R \geq 60\,000$ в произвольные даты 2019–2021 гг., найдена переменность лучевой скорости: гелиоцентрическая V_r по измерениям положений множества абсорбций металлов меняется от даты к дате со стандартным отклонением $\Delta V_r \approx 1.4 \text{ км с}^{-1}$ около среднего значения $V_r = 24.75 \text{ км с}^{-1}$, что может быть следствием малоамплитудных пульсаций в атмосфере. Спектры звезды чисто абсорбционные, явные эмиссии отсутствуют. Обнаружена переменность интенсивности большинства абсорбций и полос системы Свана молекулы C_2 . В отдельные моменты наблюдается слабая асимметрия профиля профиля $\text{H}\alpha$. Положение ее абсорбционного ядра изменяется в пределах $27.3\text{--}30.6 \text{ км с}^{-1}$. Обнаружено расщепление на два компонента (или асимметрия) сильных абсорбций низкого возбуждения (Y II , Zr II , Ba II , La II , Ce II , Nd II). Положение длинноволнового компонента совпадает с положением иных фотосферных абсорбций, что подтверждает его формирование в атмосфере звезды. Положение коротковолнового компонента близко к положению вращательных деталей полос системы Свана, что указывает на его формирование в околозвездной оболочке, расширяющейся со скоростью около $V_{\text{exp}} = 16 \text{ км с}^{-1}$.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия на 6-метровом телескопе БТА выполняется детальная спектроскопия далеко проэволюционировавших звезд, прошедших эволюционные этапы с нуклеосинтезом в звездных ядрах и эпизоды с потерей массы за счет звездного ветра и сброса оболочек. Многочисленные результаты, полученные в рамках программы, кратко представлены в обзоре Klouchkova et al. (2022). Одно из основных направлений наших исследований — спектроскопия массивных гипергигантов с исходными массами $20\text{--}40 M_{\odot}$ вблизи предела светимости на диаграмме Герцшпрунга–Рессела. Результаты спектрального мониторинга на БТА этих крайне редко встречающихся объектов суммированы в недавнем обзоре Klouchkova (2019a). Менее массивные звезды с исходными массами в интервале около $2\text{--}8 M_{\odot}$ на продвинутых стадиях эволюции наблюдаются на так называемой асимптотической ветви гигантов (далее — AGB) в виде красных сверхгигантов с эффективной температурой $T_{\text{eff}} \approx 3000\text{--}4500 \text{ К}$. Далеко проэволюционировавшие AGB-звезды на стадиях слое-

вого горения водорода и гелия испытывают значительную потерю вещества за счет мощного (темп в интервале $10^{-8}\text{--}10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$) звездного ветра (Höfner and Olofsson 2018). За счет ветра вокруг звезды образуется расширяющаяся газопылевая оболочка, присутствие которой проявляется в избытках потока в ИК-диапазоне, в наличии специфических деталей в радио- и ИК-спектрах. Околозвездные газопылевые оболочки, образовавшиеся на стадиях эволюции RGB, AGB и post-AGB, проявляются в больших избытках ИК-излучения, что служит основным критерием отбора этих объектов (Kwok 1993).

Интерес к AGB-звездам и к ближайшим их потомкам — post-AGB звездам обусловлен, в частности, и тем, что именно в недрах этих звезд, находящихся на кратковременной эволюционной стадии, возникают физические условия для синтеза ядер тяжелых металлов и последующего их выноса в звездную атмосферу. Вследствие этих процессов AGB-звезды являются основными поставщиками (свыше 50%) всех элементов тяжелее железа, синтезированных за счет s -процесса, суть которого состоит в медленной (по сравнению с β -распадом) нейтронизации ядер. Детали эволю-

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

ции звезд вблизи AGB и результаты современных расчетов синтеза и выноса элементов приведены в статьях Bloeker (1995), Di Criscienzo et al. (2016), Herwig (2005), Liu et al. (2018).

Часть AGB и post-AGB сверхгигантов доступна оптической спектроскопии с высоким спектральным разрешением. Обзоры этих исследований, выполненных на 6-метровом телескопе, опубликованы нами в работах Klochkova (1997; 2014; 2019b). В эту программу наблюдений входит и холодный сверхгигант GSC 04050–02366, ассоциированный с ИК-источником IRAS Z02229+6208 (далее в тексте IRAS Z02229). Эта звезда спектрального класса G8–K0 Ia (Hrivnak and Kwok 1999) слаба в видимом диапазоне из-за значительного межзвездного и околозвездного поглощения, поэтому она имеет недолгую и необширную историю изучения.

Данные спутника IRAS указали на наличие мощного потока в полосе на 25 мкм для источника IRAS Z02229, что стимулировало начало активного исследования объекта. Особо плодотворным в изучении системы IRAS Z02229 оказался 1999 год. Hrivnak and Kwok (1999) по оптическим спектрам низкого разрешения выявили наличие абсорбционных полос молекул C_2 и C_3 и отнесли объект к малочисленной группе протопланетарных туманностей (PPN) с эмиссией на длине волны на $\lambda = 21$ мкм. Эти же авторы (Hrivnak and Kwok 1999) суммировали основные сведения о системе источника IRAS Z02229, опубликованные к моменту их работы: двугорбый вид SED, избыток цвета $E(B - V) = 1.0$, значительная протяженность околозвездной оболочки, включая ее протяженность в H α ; интенсивная оболочечная эмиссия в полосе (3; 2) молекулы CO, позволившая определить системную скорость этого объекта $V_{\text{sys}} = +24.3$ км с⁻¹ и скорость расширения оболочки $V_{\text{exp}} = +15.2$ км с⁻¹.

Необходимые в нашей работе сведения, опубликованные о звезде GSC 04050–02366, ассоциированной с ИК-источником IRAS Z02229, указаны в таблице 1. При столь высоком избытке цвета объект, предшественник GSC 04050–02366 на предыдущей стадии AGB, относится к так называемым ERO C-rich звездам, согласно типу звезд с мощными оболочками (Extremely Red Objects), введенному Groenewegen (2022). Здесь важно отметить существенное различие значений эффективной температуры и избытка цвета для этой звезды, определенных различными методами: методом моделей атмосфер в работе Reddy et al. (1999) и моделированием распределения энергии в спектре (SED) с использованием параллакс Gaia EDR3 (Kamath et al. 2022).

Таблица 1. Основные сведения о post-AGB звезде GSC 04050–02366, ассоциированной с ИК-источником IRAS Z02229

Параметр	Значение
α	02 ^h 26 ^m 41 ^s .8
δ	+62° 21' 22''
l/b	133°7/1°5
π	0.3806 mas (Brown et al. 2021)
S_p	G8–K0 Ia: (Hrivnak and Kwok 1999)
L/L_{\odot}	12 959 (Kamath et al. 2022)
T_{eff}	5400 K (Reddy et al. 1999) 5952 K (Kamath et al. 2022)
$E(B - V)$	1.0 (Hrivnak and Kwok 1999) 1.9 (Kamath et al. 2022)
[Fe/H]	–0.4 (Reddy et al. 1999)

Следующим важным этапом исследований стала широко цитируемая работа Reddy et al. (1999). Эти авторы на базе оптического спектра высокого разрешения, полученного с эшелле-спектрографом 2.7-м телескопа обсерватории McDonald, определили параметры модели атмосферы звезды и детальный химический состав атмосферы. В итоге авторы Reddy et al. (1999) пришли к выводу о том, что металличность атмосферы звезды понижена: $[Fe/H]_{\odot} = -0.5$ при больших избытках углерода $[C/Fe]_{\odot} = +0.8$ и тяжелых металлов s -процесса $[s/Fe]_{\odot} = +1.4$. Такие особенности химического состава свидетельствуют о том, что звезда прошла эволюционную стадию AGB и эпизод третьего перемешивания.

До настоящего времени не было повторной регистрации оптического спектра GSC 04050–02366, что послужило для нас стимулом начать спектральный мониторинг звезды с высоким спектральным разрешением. В данной статье мы представляем результаты анализа нескольких оптических спектров GSC 04050–02366, полученных на 6-м телескопе БТА в произвольные даты в 2019–2021 гг. Основная цель нашей работы — поиск возможной переменности профилей спектральных деталей и изучение поведения картины лучевых скоростей со временем. В разделе 2 статьи кратко описаны методы наблюдений и анализа данных. В разделе 3 приведены наши результаты в сопоставлении с опубликованными ранее, в разделе 4 приводим обсуждение полученных результатов, основные выводы перечислены в разделе 5.

Таблица 2. Результаты измерений гелиоцентрической лучевой скорости V_r в спектрах GSC 04050–02366

Дата/JD	V_r , км с ⁻¹			
	Абсорбции	H α (core)	Swan	DIBs
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
19–23.12.1996*	18 \pm 1		6	
06.12.2019/2458824.3	20.37 \pm 0.01 (283)	32.2	8.8 \pm 0.20 (24)	-7.4 \pm 0.5 (7)
26.10.2020/2459149.3	25.62 \pm 0.01 (327)	27.9	8.6 \pm 0.01 (87)	-6.2 \pm 0.4 (9)
29.11.2020/2459182.5	25.81 \pm 0.01 (330)	29.9	9.0 \pm 0.10 (11)	-6.7 \pm 0.7 (3)
23.10.2021/2459511.2	26.10 \pm 0.01 (466)	26.1	9.7 \pm 0.16 (29)	

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

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

Спектры GSC 04050–02366 получены с эшелле-спектрографом НЭС (Panchuk et al. 2017), стационарно расположенным в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. Моменты наблюдений звезды указаны в таблице 2. В настоящее время спектрограф НЭС оснащен крупноформатной ПЗС-матрицей форматом 4608 \times 2048 элементов с размером элемента 0.0135 \times 0.0135 мм, шум считывания $1.8e^-$. Зарегистрированный спектральный диапазон на наших спектрах GSC 04050–02366 составляет $\Delta\lambda = 470\text{--}778$ нм. Для уменьшения световых потерь без потери спектрального разрешения спектрограф НЭС снабжен резателем изображения на три среза. Спектральное разрешение составляет $\lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$, отношение сигнала к уровню шумов вдоль эшеллевого порядка в спектрах меняется от 40 до 70. Кроме того, сигнал значительно снижается в коротковолновой части эшелле-кадра из-за значительного поглощения излучения звезды в оболочке.

3. ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА И ПОВЕДЕНИЕ ЛУЧЕВОЙ СКОРОСТИ

Для отождествления деталей в спектрах GSC 04050–02366 мы использовали спектральный атлас GSC 04050-02366 мы использовали спектральный атлас (Klochko et al. 2007a; b), базирующийся на основе детальной спектроскопии родственной post-AGB звезды HD 56126 (IRAS 07134+1005), а также спектральный атлас (Wagner 1994) для углеродных звезд.

3.1. Лучевая скорость

Все результаты измерения гелиоцентрической скорости V_r приведены в столбцах (2)–(5) таблицы 2. Для симметричных абсорбций, вращательных

компонентов полос системы Свана и межзвездных деталей DIBs указаны средние значения по выборкам деталей и ошибки этих средних. Из сопоставления данных во втором столбце таблицы, полученных с высокой точностью, следует переменность лучевой скорости: среднее значение V_r по измерениям положений множества абсорбций металлов меняется от даты к дате около среднего значения $V_r = 24.75$ км с⁻¹ со стандартным отклонением от среднего $\Delta V_r = 1.4$ км с⁻¹, что может быть следствием малоамплитудных пульсаций в атмосфере.

3.2. Полосы системы Свана

Как было показано в статьях Hrivnak and Kwok (1999), Reddy et al. (1999), одной из самых заметных особенностей оптического спектра этой звезды являются полосы углеродсодержащих молекул CN, C₂ и C₃. Все наши спектры также содержат полосы системы Свана молекулы C₂. Причем, в спектрах, зарегистрированных нами в 2019–2021 гг., все полосы системы Свана присутствуют в виде абсорбций. Для иллюстрации на рис. 1 приведен фрагмент спектра, включающий полосу системы Свана молекулы C₂ (0; 1) с кантом на $\lambda = 5635$ Å для четырех моментов наблюдений. Изменение интенсивности полосы нельзя объяснить различием условий наблюдений, поскольку спектры 2019–2020 гг. получены в наблюдательные ночи с отличной прозрачностью и качеством изображения $\beta = 1''\text{--}1''5$. Лишь в ночь 23.10.2021 качество изображения было несколько хуже: $\beta \approx 3''$.

Переменность интенсивности полосы на этом рисунке может быть объяснена несферичностью оболочки, что вызывает разную степень ее вклада в наблюдаемый спектр. Это предположение согласуется с типом морфологии «elongated» для изображения IRAS Z02229, полученного с HST (Sahai

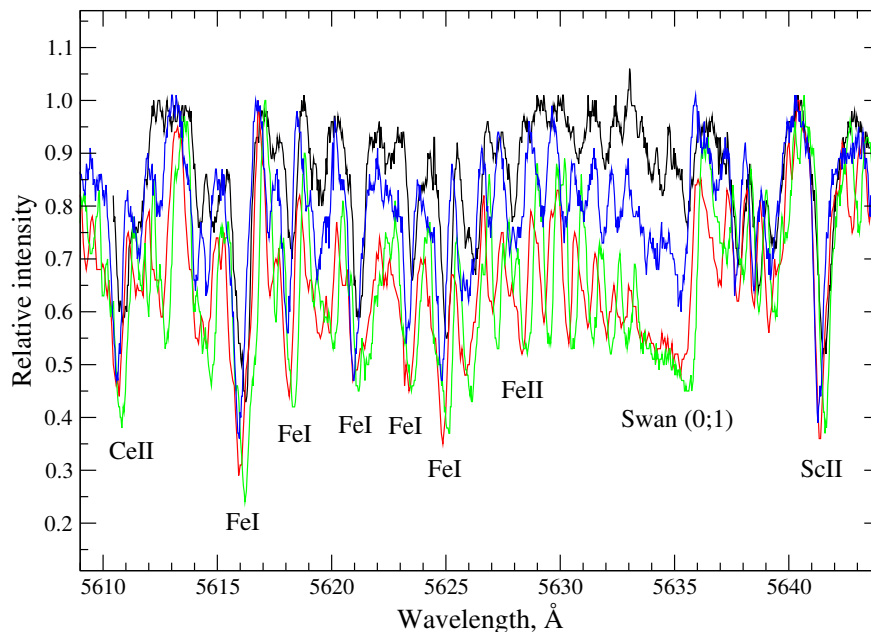


Рис. 1. Фрагменты спектра GSC 04050–02366 с полосой системы Свана $C_2(0; 1)$ в разные моменты наблюдений: черная линия — 06.12.2019, красная — 26.10.2020, зеленая — 29.11.2020, синяя — 23.10.2021. Указано отождествление основных абсорбций в данном фрагменте, включая кант полосы молекулы C_2 на длине волны около $\lambda 5635 \text{ \AA}$.

et al. 2007). Несферичность пылевой оболочки в системе IRAS Z02229 также подтверждается и высоким уровнем поляризации (Akrag et al. 2017, Ueta et al. 2005; 2007). Таким образом проявляется влияние мощной оболочки на наблюдаемый спектр звезды в целом.

3.3. Профиль $H\alpha$

Спектры GSC 04050–02366 не содержат явных эмиссионных деталей и ветровых компонентов, типичных для звезд на ранней post-AGB фазе. Как видно на рис. 2, профиль $H\alpha$ в спектрах GSC 04050–02366 почти симметричен, лишь в отдельные моменты наблюдается слабая асимметрия профиля в виде приподнятости его коротковолнового крыла. Причем это наблюдается лишь для тех двух моментов наблюдений, для которых существенно ослаблена полоса системы Свана на рис. 1. Как следует из данных в третьем столбце таблицы 2, положение абсорбционного ядра $H\alpha$ изменяется в пределах $27.3\text{--}30.6 \text{ км с}^{-1}$. Для большей части дат ядро сминуто в красную область примерно на 2 км с^{-1} , это различие, согласно данным из статьи Reddy et al. (1999), многократно выше в спектре 1996 г.

В спектрах холодного сверхгиганта с небольшим дефицитом металличности ($[Fe/H] = -0.5$ (Reddy et al. 1999)) абсорбции вращательных переходов в полосах системы Свана в основном блендированы. Однако высокое спектральное

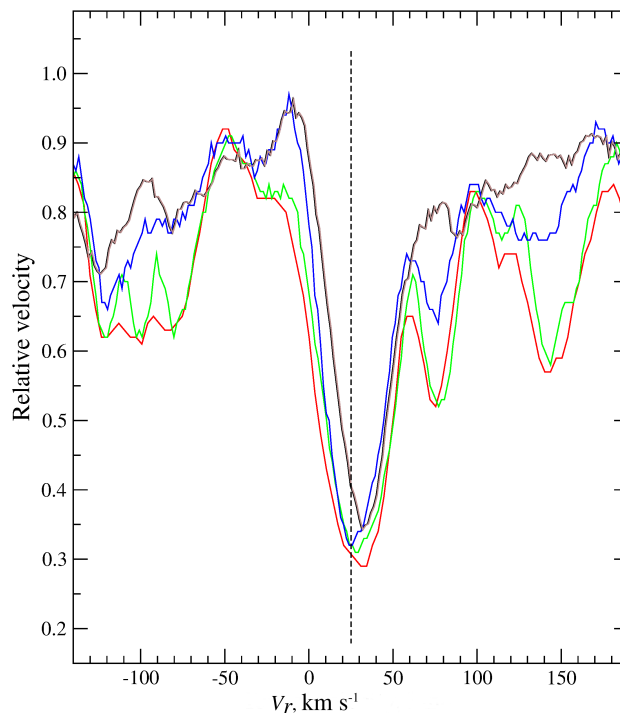


Рис. 2. Профиль $H\alpha$ в координатах «лучевая скорость—относительная интенсивность» в спектрах GSC 04050–02366, полученных в разные даты (соответствие цветов линий то же, что и на рис. 1). Здесь и далее положение штриховой вертикали совпадает со значением системной скорости $V_{\text{sys}} = +24.3 \text{ км с}^{-1}$ согласно Hrivnak and Kwok (1999).

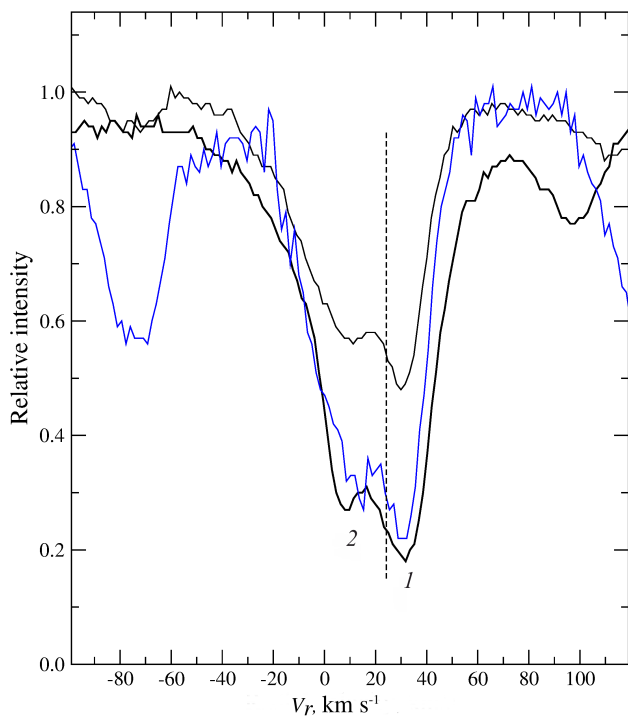


Рис. 3. Профили абсорбций Ba II λ 6141 Å (жирная черная линия), Y II λ 5200 Å (синяя линия) и La II λ 6390 Å (тонкая черная линия) в спектре за 06.12.2019. Отмечены компонент 1, положение которого согласуется с положением фотосферных абсорбций, и коротковолновый компонент 2, являющийся оболочечным (подробнее см. в тексте.)

разрешение наших данных позволяет выделить избранные детали вращательных переходов полос системы Свана, ориентируясь на их профили, узкие по сравнению с профилями фотосферных абсорбций. Средние значения измеренных скоростей V_r (Swan), их ошибки и число использованных деталей приведены в четвертом столбце таблицы 2.

3.4. Расщепленные абсорбции

Reddy et al. (1999) отметили слишком высокую интенсивность линий ионов Ba II в спектре GSC 04050–02366, что затрудняет их моделирование и расчет содержания бария в атмосфере звезды. На рис. 3 мы приводим профиль линии Ba II λ 6141 Å в нашем спектре за 06.12.2019. Здесь хорошо видна сложная структура профиля этой линии, расщепленного на два компонента. На этом рисунке отмечен компонент 1, положение которого согласуется с положением других фотосферных абсорбций, что указывает на его формирование в атмосфере звезды. Коротковолновый компонент 2 является оболочечным, поскольку его положение соответствует скорости $V_r \approx 9.0 \text{ км с}^{-1}$, близкой к

лучевой скорости по вращательным деталям полос системы Свана. На этом же рисунке дополнительно приведены профили сильных абсорбций La II λ 6390 Å и Y II λ 5200 Å, расщепленные на аналогичные компоненты. Как видно на рис. 3, ширина коротковолнового компонента у каждой линии существенно ниже ширины длинноволнового, что подтверждает формирование коротковолнового компонента в оболочке.

В спектрах GSC 04050–02366 самые сильные абсорбции металлов или ионов (K I, Na I, Y II, Zr II, Ba II, La II, Ce II, Nd II) с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня ($\chi_{\text{low}} \leq 1 \text{ eV}$) расщеплены на два компонента или же имеют асимметричный профиль. При наличии явного расщепления положение их длинноволнового компонента совпадает с положением нерасщепленных абсорбций других металлов, что подтверждает его формирование в атмосфере звезды. Положение коротковолнового компонента близко к положению деталей полос системы Свана, что указывает на его формирование в околозвездной среде. Очевидно, что этот эффект расщепления увеличивает эквивалентную ширину соответствующих абсорбций и при пониженном спектральном разрешении его следует учитывать в определении содержаний тяжелых металлов.

На рис. 4 мы сравниваем профили расщепленных профилей Ba II λ 6141 Å и La II λ 6390 Å в спектрах за четыре даты наших наблюдений. В целом характер расщепления сохраняется для всех моментов наблюдений.

3.5. Межзвездные детали

В спектре удаленной звезды вблизи плоскости Галактики естественно ожидать присутствия набора межзвездных деталей, что хорошо иллюстрируют профили линий Na I λ 5895 Å (жирная линия) и K I λ 7699 Å на рис. 5. Здесь компонент 1 ($V_r \approx 30 \text{ км с}^{-1}$) формируется в атмосфере звезды, компонент 2 ($V_r \approx 7.4 \text{ км с}^{-1}$) — в околозвездной оболочке, где формируются и полосы системы Свана. На профиле линии Na I λ 5895 Å надежно выделяются лишь межзвездные компоненты 6 и 7. На профиле линии K I λ 7699 Å присутствует компонент $V_r = -7.5 \text{ км с}^{-1}$, его межзвездное происхождение подтверждается согласием этой скорости со скоростями в последней колонке таблицы 2 по отождествленным DIBs. Диапазон скоростей от $V_r = -2.0 \text{ км с}^{-1}$ до $V_r = -22.0 \text{ км с}^{-1}$, в который попадают компоненты 3–5 профиля Na I, представляет собой совокупность межзвездных абсорбций, не разделяемых при спектральном разрешении спектрографа НЭС. Следует также

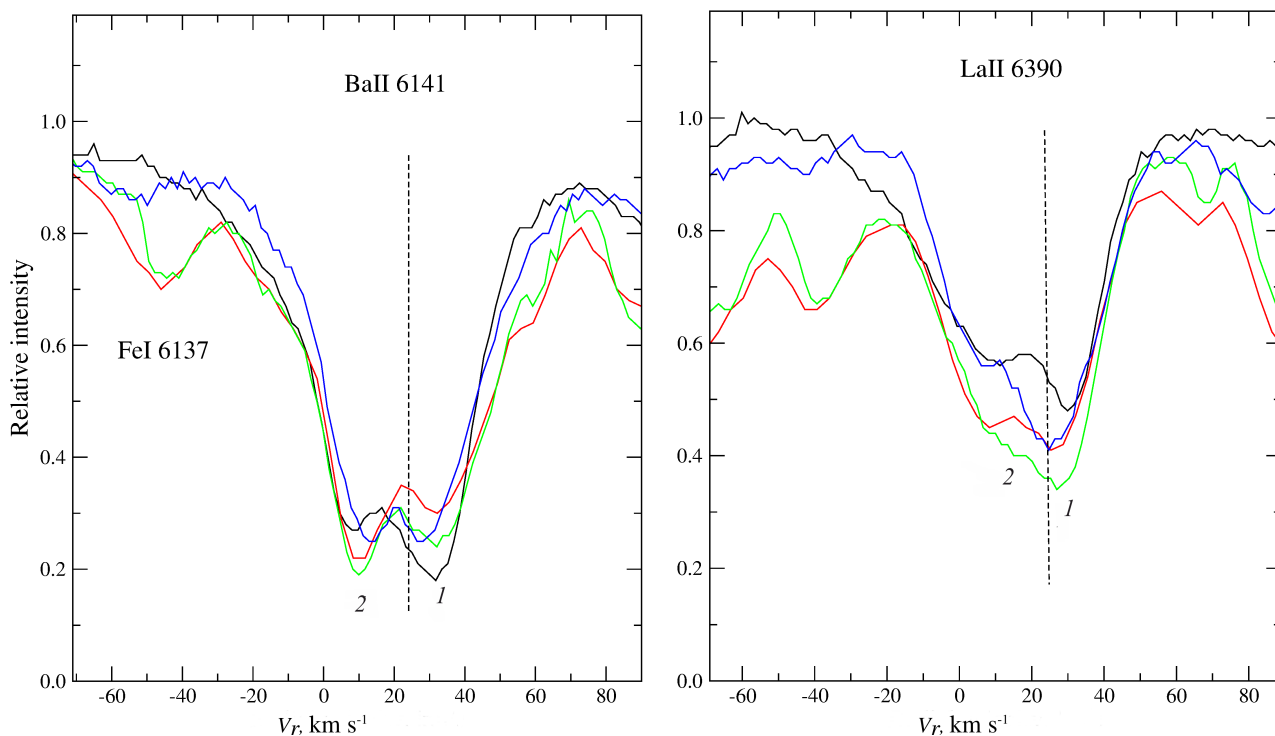


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но для абсорбций Ba II λ 6141 Å и La II λ 6390 Å в спектрах за четыре даты.

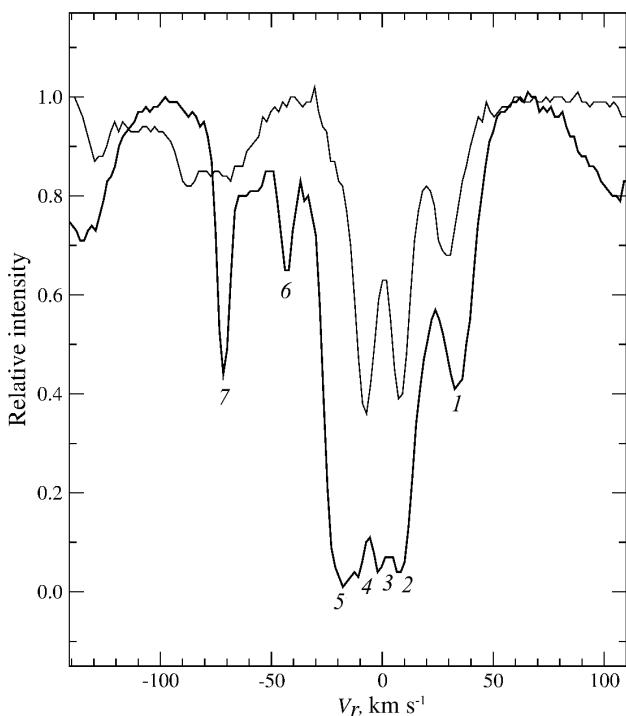


Рис. 5. Многокомпонентные профили линий Na I λ 5895 Å (жирная линия) и K I λ 7699 Å в спектре GSC 04050–02366, полученном 06.12.2019. Отмечены компоненты профиля линий Na I: 1 и 2 формируются в атмосфере звезды и в околозвездной оболочке соответственно, компоненты 3–7 — межзвездные.

учитывать, что при продолжительных экспозициях слабой звезды может быть зарегистрирована эмиссия Na I теллурического происхождения, положение которой в гелиоцентрической системе скоростей меняется от даты к дате наблюдений.

Упомянем, что близкие межзвездные компоненты профиля линий Na I λ 5889 Å и λ 5895 Å ($V_r = -8.5, -44.4, -65.3$ км с⁻¹) были отождествлены ранее в спектрах центральной звезды ИК-источника IRAS 02441+6922 (Klochko et al. 2017), галактические координаты которого $l/b = 132^\circ 9/9^\circ 2$ мало отличаются от координат IRAS Z02229. В спектре этого объекта были надежно измерены положения выборки DIBs: их положение соответствует скорости $V_r = -9.3 \pm 0.3$ км с⁻¹. Межзвездные компоненты дублета Na I с близкими скоростями зарегистрированы в работе Miroshnichenko et al. (2021) и в спектре удаленной горячей звезды VES 723, галактические координаты которой также близки к координатам GSC 04050–02366: $l/b = 132^\circ 4/1^\circ 1$.

В спектрах холодной звезды с богатым абсорбционным спектром в сочетании с молекулярными полосами затруднительно отождествить диффузные полосы DIBs. Помимо самых сильных DIBs на длинах волн λ 5780 Å и λ 6284 Å, нам удалось отождествить лишь несколько DIBs, усредненное положение которых, $V_r \approx -6.7$ км с⁻¹, согласуется с положением межзвездной компоненты K I.

В заключение этого раздела отметим, что Reyniers et al. (2002) показали, что абсорбцию на $\lambda \approx 6707.8 \text{ \AA}$ следует отождествить с $\text{Ce II } \lambda 6708.099 \text{ \AA}$. Например, авторы Klochkova et al. (2008), Reddy et al. (1999) отождествили эту абсорбцию в спектрах post-AGB звезд с линией $\text{Li I } \lambda 6707.76 \text{ \AA}$ и сделали вывод об избытке лития в атмосферах этих звезд. Reddy et al. (1999) отмечали ненадежность определения содержания лития в атмосфере GSC 04050–02366 на основе интенсивности абсорбции около $\lambda 6707 \text{ \AA}$ из-за возможного блендирования линиями CN и Ce. Мы надежно отождествили эту абсорбцию с линией $\text{Ce II } \lambda 6708.099 \text{ \AA}$, поскольку измерения лучевой скорости по положению этой детали отлично согласуются со средним значением V_r по линиям металлов.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все имеющиеся у нас спектры GSC 04050–02366 чисто абсорбционные. В то же время мы выявили переменность спектра и особенности поведения ряда абсорбционных деталей. Фотометрические наблюдения этой звезды также указывают на значительную переменность. По данным наблюдений GSC 04050–02366 в 2014–2018 гг. из обзора ASAS-SN (Kochanek et al. 2017), видимый блеск звезды изменяется в интервале $11^{\text{m}}6-12^{\text{m}}2$. На основе анализа этих продолжительных наблюдений в базе данных ASAS-SN сделаны оценки периода $P = 443^{\text{d}}04$ и амплитуды переменности $\Delta V = 0^{\text{m}}47$. Несколько ранее фотометрические особенности GSC 04050–02366 среди выборки родственных post-AGB звезд были изучены Hrivnak et al. (2010). Эти авторы выявили долговременную переменность блеска, наличие нескольких периодов при доминирующем около 153 дней, а также сочетание глубоких минимумов (до $\Delta V \approx 0^{\text{m}}54$) с более пологими. Совокупность фотометрических особенностей для IRAS Z02229 и родственных объектов позволила этим авторам сделать выбор в пользу пульсаций, а не двойственности, как причине переменности.

В спектрах GSC 04050–02366 нет ветровых компонентов и типичных для спектров post-AGB звезд эмиссионных деталей, возникающих в атмосфере звезды или в околозвездной среде. К примеру, в спектре HD 56126 (IRAS 07134+1005) переменный во времени профиль $\text{H}\alpha$, как правило, содержит эмиссию (Klochkova et al. 2007b, Lebre et al. 1996). В оптических спектрах V510 Pup (IRAS 08005–2356) мощный эмиссионный компонент присутствует как в профилях водородных линий, включая линии пашеновской серии, так и в

избранных линиях ионов металлов (Klochkova and Chentsov 2004).

Своеобразным является спектр центральной звезды ИК-источника RAFGL 5081. Эта звезда, как и GSC 04050–02366, имеет эффективную температуру $T_{\text{eff}} \approx 5400 \text{ K}$ (Klochkova et al. 2017), близкую к эволюционному переходу от AGB к post-AGB, согласно Soker (2008). В спектре RAFGL 5081 линия $\text{H}\alpha$ имеет многокомпонентный и переменный со временем профиль, содержащий слабую эмиссию (Klochkova et al. 2017). Однако, как следует из рис. 2, профиль $\text{H}\alpha$ в спектрах GSC 04050–02366 почти симметричен, его абсорбционное ядро расположено вблизи среднего значения скорости $V_r = +24.8 \text{ км с}^{-1}$ для всех моментов наблюдений.

В спектре GSC 04050–02366 зарегистрированы лишь запрещенные эмиссии $[\text{O I}] \lambda 5577$, $\lambda 6300 \text{ \AA}$ теллурического происхождения. Слабая эмиссия приподнимает коротковолновое крыло профиля $\text{H}\alpha$ лишь для тех двух моментов наблюдений, для которых существенно ослаблена полоса системы Свана молекулы C_2 на рис. 1. Это совпадение позволяет предположить наличие асимметрии (или неоднородностей) в оболочке.

Разность лучевых скоростей, приведенных в колонках (2) и (4) таблицы 2, позволяет нам оценить скорость расширения оболочки $V_{\text{exp}} \approx 16 \text{ км с}^{-1}$, что согласуется с результатом на основе CO-профиля (Hrivnak and Kwok 1999). Если рассмотреть сводку значений V_{exp} для post-AGB звезд из работы Klochkova (2014), можно увидеть, что скорость расширения оболочки в системе IRAS Z02229 типична для объектов этого типа. Отметим также, что большинство post-AGB звезд с оболочками, обогащенными углеродом, имеют близкую морфологию оболочки (биполярная или вытянутое гало) и эмиссию на $\lambda = 21 \text{ мкм}$.

Сопоставление результатов позиционных измерений в спектрах, полученных нами в произвольные даты 2019–2021 гг., выявило переменность гелиоцентрической лучевой скорости: усредненная по измерениям положений совокупности абсорбций металлов скорость меняется в интервале $V_r = 20.8-26.1 \text{ км с}^{-1}$. Наличие переменности подтверждается и более ранним значением скорости $V_r = 18 \pm 1 \text{ км с}^{-1}$, приведенным в статье Reddy et al. (1999) по наблюдениям в декабре 1996 г. Наиболее вероятной причиной переменности лучевой скорости с амплитудой около $\Delta V_r \approx 1.4 \text{ км с}^{-1}$ могут быть малоамплитудные пульсации, которые типичны для post-AGB звезд (Aikawa 2010).

Звезда GSC 04050–02366 с ее фундаментальными параметрами попадает в область на рис. 1

в статье Aikawa (2010), заселенную переменными *post*-AGB звездами. Наличие пульсаций в атмосфере этой звезды подтверждается и фотометрической переменностью с амплитудой 0^m47 на основе наблюдений в базе данных ASAS-SN.

В результате изучения в последние два–три десятилетия кандидатов в *post*-AGB звезды выделена группа объектов с атмосферами, обогащенными тяжелыми металлами *s*-процесса. Полный список звезд этого типа с большим набором сведений (эффективная температура, светимость, избытки цвета, SED, химический состав атмосферы) опубликован в обзоре Kamath et al. (2022). Аналогами GSC 04050–02366 по совокупности наблюдаемых свойств (избытки углерода и тяжелых металлов в атмосферах, большой избыток цвета, обусловленный мощными пылевыми оболочками, спектральные детали углеродсодержащих молекул, эмиссия на $\lambda = 21$ мкм) являются центральные звезды ИК-источников IRAS 04296+3429, IRAS 19500–1709, IRAS 20000+3239, IRAS 22223+4327, IRAS 23304+6147. *Post*-AGB звезды — члены данной группы — при близости основных параметров имеют и свои специфические различия. Например, в оптическом спектре *post*-AGB звезды V448 Lac в системе ИК-источника IRAS 22223+4327 зарегистрированы все групповые признаки: переменность лучевой скорости, проявления околозвездной оболочки в виде полос системы Свана молекулы C_2 , асимметрия сильных абсорбций ионов Si II, Y II, La II, Ba II (Klochkova et al. 2010). При этом в отдельные моменты наблюдений в спектре V448 Lac зарегистрировано появление эмиссии в полосе системы Свана (Klochkova et al. 2010). V448 Lac также входит в выделенную группу *post*-AGB звезд с эмиссией на длине волны 21 мкм (Volk et al. 1999). Эта эмиссия пока не имеет определенного отождествления, несмотря на многочисленные предложенные версии (Zhang et al. 2009).

Интересна также система ИК-источника IRAS 04296+3429, которая подобно IRAS Z02229 обладает мощным потоком ИК-излучения. Центральная звезда GSC 02381–0104 в этой системе дальше продвинулась к стадии планетарной туманности, чем GSC 04050–02366, но в целом ее фундаментальные параметры и распределение энергии в спектре этой системы (Klochkova et al. 1999) близки к таковым у системы ИК-источника IRAS Z02229. Удаленная звезда GSC 02381–0104 слаба для спектроскопии высокого разрешения (видимый блеск $V > 14^m$), но ее оптический спектр (G8Ia) близок к спектру GSC 04050–02366, при этом она является рекордсменом по интенсивности эмиссии в полосах системы Свана (0; 0) и (0; 1) (Klochkova et al. 1999). Большая удаленность этого объекта от AGB-фазы, вероятно, приводит к

значительному расширению оболочки, что способствует формированию эмиссии в околозвездных деталях

Близким родственником GSC 04050–02366 является *post*-AGB сверхгигант V5112 Sgr (IRAS 19500–1709), оболочка которого также обогащена тяжелыми металлами, что проявляется в расщеплении профилей резонансных абсорбций (Klochkova 2013). Причем пекулярность оптического спектра V5112 Sgr выражена значительнее: профили сильных абсорбций Ba II расщеплены на три компонента. Два коротковолновых компонента возникают в двух различных слоях структурированной оболочки звезды, сформировавшихся на двух предшествующих этапах эволюции звезды и расширяющихся со скоростями $V_{\text{exp}} \approx 20$ и 30 км с^{-1} .

Холодный *post*-AGB сверхгигант GSC 04050–02366 входит в группу одиночных *post*-AGB звезд, которые прошли стадию с эффективным *s*-процессом и третьим перемешиванием. Эта группа к настоящему времени насчитывает около двух десятков звезд, все они перечислены в обзорах Kamath et al. (2022), Klochkova (1997; 2019b). Лишь в спектрах четырех из них обнаружено расщепление резонансных абсорбций металлов вследствие их выноса в околозвездную среду.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

К основным новым результатам данной работы мы относим следующие:

- 1) обнаружение временной переменности лучевой скорости по измерениям положений множества абсорбций металлов. Скорость V_r меняется около среднего значения $V_r = 24.75 \text{ км с}^{-1}$ со стандартным отклонением от среднего $\Delta V_r = 1.4 \text{ км с}^{-1}$, что может быть следствием малоамплитудных пульсаций в атмосфере;
- 2) обнаружение переменности со временем профилей спектральных деталей, включая интенсивность большинства абсорбций и полос системы Свана молекулы C_2 , а также слабую переменность профиля $H\alpha$;
- 3) обнаружение расщепления на два компонента (или асимметрии) сильных абсорбций низкого возбуждения (Y II, Zr II, Ba II, La II, Nd II). Длинноволновый компонент, положение которого согласуется с положением симметричных абсорбций иных металлов, формируется в атмосфере звезды;
- 4) положение коротковолнового компонента расщепленных абсорбций совпадает с положением деталей полос системы Свана, что указывает на его формирование в околозвездной

оболочке, расширяющейся со скоростью около $V_{\text{exp}} = 16 \text{ км с}^{-1}$. Таким образом post-AGB сверхгигант GSC 04050–02366 является четвертым объектом в группе звезд, для которых обнаружен вынос тяжелых металлов s -процесса в околозвездную оболочку.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдательные данные получены на уникальной научной установке Большой Телескоп Азимутальный САО РАН. 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**, A45 (2010).
2. S. Akras, J. C. Ramírez Vélez, N. Nanouris, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **466** (3), 2948 (2017).
3. C. Barnbaum, *Astrophys. J. Suppl.* **90**, 317 (1994).
4. T. Bloeker, *Astron. and Astrophys.* **297**, 727 (1995).
5. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1 (2021).
6. M. Di Criscienzo, P. Ventura, D. A. García-Hernández, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462** (1), 395 (2016).
7. M. A. T. Groenewegen, *Astron. and Astrophys.* **659**, id. A145 (2022).
8. F. Herwig, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43** (1), 435 (2005).
9. S. Höfner and H. Olofsson, *Astron. Astroph. Rev.* **26** (1), id. 1 (2018).
10. B. J. Hrivnak and S. Kwok, *Astrophys. J.* **513** (2), 869 (1999).
11. B. J. Hrivnak, W. Lu, R. E. Maupin, and B. D. Spitzbart, *Astrophys. J.* **709** (2), 1042 (2010).
12. D. Kamath, H. Van Winckel, P. Ventura, et al., *Astrophys. J.* **927** (1), id. L13 (2022).
13. V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 5 (1997).
14. V. G. Klochkova, *Astronomy Letters* **39** (11), 765 (2013).
15. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 279 (2014).
16. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 475 (2019a).
17. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 475 (2019b).
18. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **48** (4), 301 (2004).
19. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **63** (2), 112 (2008).
20. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., *Baltic Astronomy* **16**, 155 (2007a).
21. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., *Astronomy Reports* **61** (11), 962 (2017).
22. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavganskaya, and M. V. Shapovalov, *Astrophysical Bulletin* **62** (2), 162 (2007b).
23. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavolzhanskaya, *Astronomy Reports* **54** (3), 234 (2010).
24. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, *Astrophysical Bulletin* **77** (1), 84 (2022).
25. V. G. Klochkova, R. Szczerba, V. E. Panchuk, and K. Volk, *Astron. and Astrophys.* **345**, 905 (1999).
26. C. S. Kochanek, B. J. Shappee, K. Z. Stanek, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **129** (980), 104502 (2017).
27. S. Kwok, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 63 (1993).
28. A. Lebre, N. Maun, D. Gillet, and D. Barthes, *Astron. and Astrophys.* **310**, 923 (1996).
29. N. Liu, R. Gallino, S. Cristallo, et al., *Astrophys. J.* **865** (2), 112 (2018).
30. A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (1), 879 (2021).
31. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61** (9), 820 (2017).
32. B. E. Reddy, E. J. Bakker, and B. J. Hrivnak, *Astrophys. J.* **524** (2), 831 (1999).
33. M. Reyniers, H. Van Winckel, E. Biémont, and P. Quinet, *Astron. and Astrophys.* **395**, L35 (2002).
34. R. Sahai, M. Morris, C. Sánchez Contreras, and M. Claussen, *Astron. J.* **134** (6), 2200 (2007).
35. N. Soker, *Astrophys. J.* **674** (1), L49 (2008).
36. T. Ueta, K. Murakawa, and M. Meixner, *Astron. J.* **129** (3), 1625 (2005).
37. T. Ueta, K. Murakawa, and M. Meixner, *Astron. J.* **133** (4), 1345 (2007).
38. K. Volk, S. Kwok, and B. J. Hrivnak, *Astrophys. J.* **516** (2), L99 (1999).
39. K. Zhang, B. W. Jiang, and A. Li, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **396** (3), 1247 (2009).

**Detailed Spectroscopy of Post-AGB Supergiant GSC 04050–02366
in IRAS Z02229+6208 IR Source System****V. G. Klochkova¹ and V. E. Panchuk¹**¹ Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

In the optical spectra of the cold post-AGB supergiant GSC 04050–02366, obtained with the 6-m BTA telescope with a resolution of $R \geq 60\,000$ on arbitrary dates over 2019–2021, a radial velocity variability is found: heliocentric V_r , based on the positional measurements of a set of metal absorptions varies from date to date with a standard deviation of $\Delta V_r \approx 1.4 \text{ km s}^{-1}$ about the average value of $V_r = 24.75 \text{ km s}^{-1}$, which may stem out of the low-amplitude pulsations in the atmosphere. The spectra of the star are purely absorption type, there are no obvious emissions. Intensity variability of most of absorptions and Swan bands of the C_2 molecule was discovered. A slight asymmetry of the $\text{H}\alpha$ profile is observed at some observation dates. The position of its absorption core varies within $27.3\text{--}30.6 \text{ km s}^{-1}$. Splitting into two components (or asymmetry) of strong low-excitation absorptions (Y II, Zr II, Ba II, La II, Ce II, Nd II) was found. The position of the long-wavelength component coincides with the position of other photospheric absorptions, which confirms its formation in the atmosphere of the star. The position of the shortwave component is close to the position of the rotational features of Swan bands, which indicates its formation in the circumstellar envelope expanding at a velocity of about $V_{\text{exp}} = 16 \text{ km s}^{-1}$.

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