НЕСТАБИЛЬНОСТЬ В СИСТЕМЕ УДАЛЕННОЙ POST-AGB ЗВЕЗДЫ LS III +52°24 (IRAS 22023+5249)

© 2022 г. В. Г. Клочкова^{1,*}, А. С. Мирошниченко^{2,3}, В. Е. Панчук¹, Н. С. Таволжанская¹, М. В. Юшкин¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия
²Университет в Гринсборо, Северная Каролина, США
³Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия
*E-mail: Valentina. R11@yandex.ru
Поступила в редакцию 10.01.2022 г.
После доработки 21.02.2022 г.
Принята к публикации 21.02.2022 г.

В оптических спектрах В-сверхгиганта LS III +52°24 (IRAS 22023+5249), полученных на 6-м телескопе БТА с разрешением R $\geq 60\,000$ в 2010–2021 гг., найдены признаки переменности ветра и стратификация скорости в протяженной атмосфере. Линии нейтрального водорода H α и H β имеют профиль типа P Cyg, их ветровой абсорбционный компонент меняет положение в интервале от $V_{\odot} = -270$ до -290 км/с. Интенсивность эмиссии H α достигает рекордных значений по отношению к локальному континууму: $I/I_{cont} \geq 70$. Стационарная лучевая скорость по положениям симметричных запрещенных и разрешенных эмиссий металлов принята за системную скорость $V_{sys} = -149.6 \pm 0.7$ км/с. Впервые для этой звезды, по положениям абсорбций ионов NII, OII, обнаружена переменность во времени лучевой скорости в интервале от $V_{\odot} = -127.2$ до -178.3 км/с, что указывает на возможное присутствие компаньона и/или на пульсации в атмосфере. Зафиксирована переменность профиля триплета кислорода W (OI 7774), обусловленная появлением нестабильной эмиссии. Совокупность межзвездных абсорбций профиля D-линий NaI в интервале от $V_{\odot} = -10.0$ до -167.2 км/с формируется в Местном рукаве и в последующих рукавах Галактики. Удаленность, d > 5.3 кпк, в сочетании с высокой скоростью указывает на то, что звезда находится в межрукавном пространстве Галактики за рукавом Scutum–Crux.

Ключевые слова: звезды, post-AGB звезды, звездный ветер, пульсации **DOI:** 10.31857/S0004629922060056

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты миссии телескопа IRAS открыли для астрономов небо в инфракрасных лучах. В частности, на высоких широтах Галактики были выделены ИК-источники, впоследствии отождествленные со звездами высокой светимости, в основном на эволюционной стадии после асимптотической ветви гигантов (post-AGB) [1-4]. После оптического отождествления первых IRAS-источников начался бум в исследовании этих объектов. Результаты первого десятилетия представлены в известном обзоре Квока [5]. Часть post-AGB сверхгигантов доступна спектроскопии с высоким спектральным разрешением, обзоры этих исследований, выполненных на 6-метровом телескопе, опубликованы Клочковой [6-8].

На стадии post-AGB наблюдаются далеко проэволюционировавшие звезды с исходными массами в интервале 2-8 *М*_☉. Согласно Блекеру [9], на предшествующей эволюционной стадии AGB эти звезды наблюдаются в виде красных сверхгигантов с эффективной температурой $T_{\rm eff} \approx 3000{-}4500$ К. АGB-стадия для звезд указанных выше масс является заключительной фазой с нуклеосинтезом в звездных ядрах. Интерес к AGB-звездам и к их ближайшим потомкам обусловлен, в частности, и тем, что именно в недрах этих звезд, находящихся на кратковременной эволюционной стадии, имеются физические условия для синтеза ядер тяжелых металлов и выноса наработанных продуктов ядерных реакций в звездную атмосферу и далее, в околозвездную и межзвездную среду. Вследствие этих процессов AGB-звезды с исходными массами ниже $3-4M_{\odot}$

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 эволюции звезд вблизи AGB и результаты современных расчетов синтеза и выноса элементов приведены в статьях [10–12].

В последние десятилетия среди post-AGB звезд выделена подгруппа горячих сверхгигантов, зачастую с эмиссиями в спектрах, классифицированных как звезды на стадии после AGB, приближающиеся к фазе планетарной туманности. Хорошим примером является высокоширотная горячая звезда SAO 244567 ($T_{\rm eff} \ge 35000$ K), для которой Партасарати и др. [13] за счет сравнения спектров, разделеннных во времени на 50 лет, сделали вывод о ее быстром приближении к фазе молодой планетарной туманности.

Предметом данной статьи является горячий сверхгигант LS III +52°24, ассоциированный с инфракрасным источником IRAS 22023+5249. Эта звезда фигурирует среди звезд с эмиссией в Нα в ранних исследованиях, к примеру, в списке объектов в работе [14]. В базе данных SIMBAD для звезды приведен спектральный класс Ве. Суарез и др. [15], исследуя обширную выборку звезд с избытками ИК-потока, отнесли IRAS 22023+5249 к объектам на переходе к планетарной туманности. Основные особенности оптического спектра LS III +52°24 к настоящему времени хорошо известны. Саркар и др. [16] по спектру высокого разрешения определили фундаментальные параметры звезды и особенности химического состава ее атмосферы. Получив большое значение лучевой скорости по абсорбциооным линиям, $V_{\odot} = -148.31 \pm 0.60$ км/с, эти авторы пришли к заключению о том, что LS III +52°24 - это звезда типа O-rich post-AGB. Архипова и др. [17] обнаружили быструю (от ночи к ночи) переменность блеска в полосах UBV с амплитудой переменно-

сти $\Delta V = 0.35^m$. Эти авторы обнаружили корреляцию между блеском звезды и интенсивностью линий HI, HeI, [NII], [SII] и др., а также отметили усиление за 20 лет эквивалентных ширин небулярных эмиссий [NII] и [SII].

В данной статье мы представляем результаты анализа оптических спектров LS III +52°24, полученных на 6-м телескопе БТА в 2010—2021 гг. Основная цель нашей работы — поиск переменности профилей спектральных деталей и поведение картины лучевых скоростей со временем. В разделе 2 кратко описаны методы наблюдений и анализа данных. В разделе 3 приведены результаты в сопоставлении с опубликованными ранее, и в разделе 4 обсуждаются полученные результаты и даны основные выводы.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

Спектры LS III +52°24 получены с эшельным спектрографом НЭС [18], стационарно расположенным в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. Моменты наблюдений звезды указаны в табл. 1. Эшельный спектрограф НЭС оснащен крупноформатной ПЗС-матрицей форматом 4608×2048 элементов с размером элемента 0.0135×0.0135 мм, шум считывания 1.8 е⁻. Зарегистрированный спектральный диапазон составляет $\Delta\lambda = 470-778$ нм. Для уменьшения световых потерь без потери спектрального разрешения спектрограф НЭС снабжен резателем изображения на три среза. Каждый спектральный порядок на двумерном изображении спектра повторяется трижлы со смешением поперек лисперсии эшелле-решетки. Спектральное разрешение составляет $\lambda/\Delta\lambda \ge 60\,000$, отношение сигнала к уровню шумов вдоль эшельного порядка в спектрах LS III +52°24 меняется от 40 ло 60.

Экстракция одномерных данных из двумерных эшелле-спектров выполнена с помощью модифицированного (с учетом особенностей эшелле-кадров используемого спектрографа) контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS. Детали процедуры описаны Юшкиным и Клочковой [19]. Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух спектров, полученных последовательно один за другим. Калибровка по длинам волн осуществлялась по спектрам Th-Ar лампы с полым катодом. Вся дальнейшая обработка, включающая фотометрические и позиционные измерения, выполнена с помощью современной версии программы DECH20t, разработанной Г. Галазутдиновым. Систематические ошибки измерения гелиоцентричеких скоростей V_{\odot} , оцененные по резким межзвездным компонентам NaI и теллурическим линиям, не превышают 0.25 км/с (по одной линии), случайные ошибки для неглубоких абсорбций ≈ 0.5 км/с — среднее значение на одну линию. Для усредненных величин V_☉ в табл. 1 ошибки 0.06-0.3 км/с в зависимости от числа измеренных линий. Отождествление деталей в спектре LS III +52°24 мы проводили, используя данные Клочковой и др. [20] из спектрального атласа для горячей post-AGB звезды, ассоциированной с ИК-источником IRAS 01005 + 7910. Кроме того, мы привлекли результаты отождествления деталей в спектрах родственных объектов из работ Саркара и др. [21, 16]. Для уточнения отдельных сведений для спектральных линий мы также использовали данные из базы VALD [22, 23].

Дата JD 245 0000+	V _☉ , км/с				
	Абсорбции	Симметр. эмиссии	Hα (abs)/(emis)	HeI 5876 (abs)/(emis)	HeI 6678 (abs)/(emis)
1	2	3	4	5	6
14.07.2001 ¹	-152.4	-147.3	-185.36^{2}		-182.16^{2}
2105	±0.3(8)	±0.17(15)			
27.09.2010	-178.3	-149.6	-272.1	-228.9	-210.5
5467.43	±0.2(9)	±0.08(29)	-129.7	-125.1	-121.2
07.12.2019	-151.3	-150.3	-274.6	-229.2	-210.0
8825.23	±0.3(11)	±0.06(37)	-138.2	-131.3	-125.6
29.08.2020	-140.8	-150.0	-290.5:	-210.7	-201.1
9091.47	±0.2(12)	±0.07(33)	-149.6	-121.7	-122.5
26.10.2020	-127.2	-148.6	-271.3	-213.3	-201.0
9149.27	±0.14(15)	±0.06(46)	-149.5	-122.6	-123.2
29.07.2021	-141.9	-150.1	-273.1	-229.4	-217.6
9424.52	±0.4(7)	±0.06(32)	-148.9	-123.8	-126.5

Таблица 1. Результаты измерений гелиоцентрической лучевой скорости V_{\odot} в спектрах LS III +52°24 по линиям различного типа

Примечание. Данные для 2001 г. (показаны надстрочными символами 1, 2) заимствованы из статьи [16]: 1 – средние V_{\odot} для абсорбций и запрещенных эмиссий получены усреднением соответствующих данных этих авторов; 2 – скорости ветра по профилям этих линий взяты из [16]. В 4–6 столбцах, обозначенных как (abs)/(emis), приведены лучевые скорости V_{\odot} , полученые по абсорбционным (вверху) и эмиссионным (внизу) компонентам соответствующих линий Н α и HeI.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Переменность оптического спектра LS III +52°24 и картины лучевых скоростей

Основные особенности оптического спектра горячих post-AGB звезд в настоящее время достаточно хорошо известны. Сошлемся на результаты спектроскопии высокого разрешения, опубликованные Гарсио-Ларио и др. [24], Клочковой и др. [20], Саркаром и др. [21, 16], Мелло и др. [25], Иконниковой и др. [26]. Оптический спектр LS III +52°24 – это композиция спектра горячего сверхгиганта и богатого эмиссиями спектра околозвездной туманности. В спектрах содержатся эмиссии трех типов: эмиссионный компонент комплексных линий нейтрального водорода и гелия, многочисленные симметричные разрешенные (OI, SiIII, AlIII, CII, FeI, FeII, FeIII) и запрещенные эмиссии низкого возбуждения ([NII], [OI], [SII]). Появление запрещенных эмиссий [NII], [SII] указывает на приближение к фазе планетарной туманности. Профили каждого из этих типов линий представлены на рис. 1-4.

Все запрещенные эмиссии [NII] спектре имеют наиболее простой симметричный профиль — это узкая гауссиана полушириной около ≈10 км/с. Профили запрещенных эмиссий кислорода сложнее. Как следует из рис. 4, склоны профиля эмиссии [OI] 6300 Å почти вертикальны и отстоят примерно на ±20 км/с от центра профиля. Полуширина профиля этой же эмиссии, но теллурической природы, многократно ниже ≈3 км/с. Представленные на рис. 4 профили эмиссии [OI] 6300 Å для 3 моментов наблюдений позволяют отметить наличие переменности этой линии, что может отражать сложную структуру газовой оболочки звезды.

В табл. 1 приведены результаты измерений гелиоцентрической лучевой скорости V_{\odot} в спектрах LS III +52°24 по положениям выборок линий различного типа: абсорбции, симметричные запрещенные и разрешенные эмиссии, эмиссионные и абсорбционные компоненты Н α и линий HeI. В скобках указано число использованных при усреднении деталей. Как следует из данных таблицы, скорость по выборке симметричных эмиссий, формирующихся в газовой оболочке сверхгиганта, не изменяется для всех дат наблюдений. Постоянство этой величины позволяет принять ее среднее значение в качестве системной скорости LS III +52°24: $V_{sys} = -149.6$ км/с.

Многократные наблюдения на большом временном промежутке привели нас к обнаружению переменности положений чистых абсорбций ионов. Как следует из данных во 2-м столбце таблицы, усредненная скорость по выборке абсорбций ионов OII, NII меняется в интервале значений от $V_{\odot} = -127.2$ до -178.3 км/с, что является проявлением нестабильности в глубоких слоях



Рис. 1. Профиль Н α в координатах "Лучевая скорость – относительная интенсивность" в спектрах LS III +52°24, полученных 27.09.2010 (красная линия), 07.12.2019 (зеленая линия), 29.08.2020 (синяя линия), 26.10.2020 (черная линия). Здесь и далее положение штриховой вертикали совпадает с принятым значением системной скорости $V_{\text{sys}} = -149.6 \text{ км/с}.$

атмосферы звезды. Эта переменность может быть обусловлена наличием пульсаций в протяженной атмосфере сверхгиганта или же присутствием компаньона в системе.

Переменность интенсивности линий Н α и НеІ была обнаружена ранее Архиповой и др. [17] по спектрам с низким разрешением. Наши наблюдения позволяют детализировать этот результат. Представленный на рис. 1 профиль линии Н α в координатах "Относительная интенсивность" — "Лучевая скорость" для всех моментов наблюдений содержит мощную эмиссию. Подчеркнем, что LS III +52°24 — это рекордсмен по мощности эмиссии в Н α : как следует из рис. 1, интенсивность эмиссии Н α по отношению к локальному континууму достигает значений $I/I_{\text{cont}} \ge 70-78$. Положение этой эмиссии не изменяется со временем и совпадает с принятым нами значением системной скорости $V_{\text{sys}} = -149.6 \text{ км/с}$. Переменность интенсивности эмиссии в Н α свидетельствует о переменности мощности звездного ветра и неоднородности газовой оболочки звезды.

Рисунок 2, где представлен нижний фрагмент профиля Н α , иллюстрирует смещение положения абсорбционного компонента и изменение глубины этой ветровой детали, формирующейся в верхних слоях истекающей атмосферы у основания звездного ветра. Из данных в 4-м столбце табл. 1 интервал переменности положения ветровой абсорбции составляет от $V_{\odot} = -270$ до -290 км/с. Терминальная скорость достигает ве-



Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для нижней части профиля На.

личины $V_{\odot} = -300$ км/с. На фрагменте профиля Н α , показанном на рис. 2, хорошо заметно присутствие переменного дополнительного эмиссионного компонента в длинноволновом крыле профиля Н α .

От даты к дате в спектре LS III +52°24 наблюдается и существенная переменность линий нейтрального гелия с профилями типа Р Суд. Для иллюстрации этого явления на рис. 3 сопоставлены профили линии HeI 6678 Å в спектрах за три момента наблюдений. Здесь хорошо видны переменность интенсивности и положения эмиссионного и абсорбционного компонентов. При этом терминальная скорость достигает тех же значений, что на профиле H α . Дополнительно, на рис. 5, представлены профили двух линий HeI 6678 и 7065 Å для двух дат наших наблюдений: 17.12.2019 и 29.08.2020. Здесь наиболее интересная и новая деталь – усиление ветровой абсорбции у HeI 6678 Å, в это же время, в августе 2020 г. у линии HeI 7065 Å такого рода ветровая абсорбция впервые сформировалась.

Кроме того, в спектре LS III +52°24 зафиксирована редко встречающаяся особенность – значительная переменность профиля инфракрасного триплета кислорода, OI 7775 Å, что иллюстрирует рис. 6, где сопоставлены профили триплета для двух моментов наблюдений. Эта особенность, наряду с эмиссионными компонентами на профиле D-линий NaI, была вскользь упомянута в статье Мелло и др. [25], посвященной спектроскопии горячих post-AGB звезд. Кроме того, в статье Архиповой и др. [17, табл. 8] для триплета кислорода указаны два значения суммарной эквивалентной ширины эмиссии OI 7775 Å, что также свидетельствует о переменности профиля триплета.

Отметим также, что запрещенные эмиссии [SII] 6717 и 6731 Å систематически, примерно на –20 км/с, сдвинуты в коротковолновую область



Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для линии Не I 6678 Å.

относительно других запрещенных эмиссий. Эта особенность, обусловленная стратификацией газовой оболочки, сохраняется в наших спектрах от даты к дате. Ранее она была уже отмечена Саркаром и др. [16] и для спектра за 2001 г.

3.2. Расстояние до звезды и ее светимость

Параллакс LS III +52°24 из каталога Gaia EDR3, измеренный с высокой точностью, $\pi =$ = 0.17313 ± 0.018 mas, приводит к большой величине расстояния до звезды: $d = 5.84 \pm 0.6$ кпк. В базе данных SIMBAD приведен параллакс из Gaia DR2, имеющий слишком низкую точность, $\pi = 0.0804 \pm 0.0524$ mas. В работе [27] приведены уточненный на основе моделирования данных Gaia DR3 параллакс $\pi = 0.19$ mas и соответствующее ему расстояние d = 5.34 кпк.

Значительная удаленность звезды подтверждается и наличием в структуре профиля D-ли-

ний дублета NaI межзвездных компонентов. не принадлежащих Местному рукаву. Многокомпонентный профиль линии дублета NaI 5889 Å для двух моментов наблюдений показан на рис. 7. Здесь цифрами отмечены компоненты, формирующиеся в разных слоях околозвездной и межзвездной среды. Короткими вертикальными линиями на этом рисунке указаны положения двух межзвездных компонентов линии КІ 7696 Å. Абсорбционные компоненты "3-7" в интервале скоростей от $V_{\odot} = -10.4$ до -56.1 км/с имеют межзвездное происхождение. Эмиссия "2" формируется в околозвездной газовой среде, ее положение $V_{\odot} \approx -150.2$ км/с согласуется с системной скоростью. Абсорбционные компоненты профилей линий дублета NaI $V_{\odot} = -10$ до -72 км/с были зарегистрированы ранее Клочковой и др. [28] в спектре центральной звезды родственного объекта IRAS 01005+7910, расположенного выше галактической плоскости (его широта $b = +16.6^{\circ}$).



Рис. 4. Профиль линии [OI] 6300 Å в спектрах LS III +52°24, полученных 27.09.2010 (красная линия), 07.12.2019 (зеленая линия), 29.07.2021 (черная линия). Узкие эмиссии на этом фрагменте – теллурическая линия [OI] 6300 Å.

Коротковолновая абсорбция "1", положение которой, $V_{\odot} = -170$ км/с, не меняется от даты к дате наблюдений, вероятно, возникает в околозвездной оболочке, расширяющейся со скоростью около $V_{\exp} = -20$ км/с. Эта оценка скорости расширения оболочки не противоречит значениям этого параметра из статьи Саркара и др. [16], который оценил скорость расширения исходя из ширин запрещенных линий [NII], [SII]. Скорость расширения по профилям запрещенных линий [OI] 6300 и 6363 Å существенно превышает этот параметр, что мы видим и на основе наших наблюдений. Приведенный на рис. 4 профиль линии [OI] 6300 Å по ширине профиля шире и, возможно, структурирован.

Заметим, что межзвездный компонент $V_{\odot} \approx -12$ км/с, формирующийся в Местном рукаве Галактики, был обнаружен ранее Клочковой и др.

[29] и в спектре post-AGB звезды V448 Lac (= IRAS 22223+4327). Эта звезда имеет близкие к LS III +52°24 галактические координаты, но бо́льшее значение параллакса, $\pi = 0.2375 \pm 0.0670$ mas, который соответствует расстоянию около 4.2 кпк, что согласуется с оценкой удаленности на основе системной скорости V448 Lac по данным радионаблюдений.

Средняя скорость по отождествленным в имеющихся спектрах LS III +52°24 диффузным межзвездным полосам (DIBs), V_{\odot} (DIBs) = -16.0 ± ± 0.2 км/с, согласуется со скоростью по межзвездным компонентам NaI и KI. Для оценки межзвездного поглощения мы использовали эквивалентные ширины W_{λ} доступных в наших спектрах DIBs и соотношения между избытком цвета, E(B - V), и W_{λ} согласно калибровкам Коса и Цвиттера [30]. В табл. 2 приведены усредненные



Рис. 5. Переменность профилей линий HeI 6678 (синии линии) и HeI 7065 Å (черные линии) в спектрах LS III +52°24, полученных 07.12.2019 (тонкие линии) и 29.08.2020 (жирные линии).

по нашим спектрам значения W_{λ} , а в последнем столбце соответствующие избытки цвета. Для двух линий, отсутствующих в публикации Коса и Цвиттера [30], выделенные курсивом значения E(B-V) мы получили с использованием калибровочных зависимостей Луна и др. [31]. Среднее по восьми DIBs значение $E(B-V) = 0.33^m$. Эта оценка покраснения хорошо согласуется с картиной межзвездного покраснения из работы Грина и др. [32] вблизи плоскости Галактики в направлении рукава Scutum–Crux.

Полученная для LS III +52°24 оценка покраснения E(B-V) в два раза ниже этого параметра, $E(B-V) = 0.66^m$ из статьи Архиповой и др. [17]. Столь существенное различие обусловлено различием методов оценки покраснения. В нашем случае оценка сделана на основе измеренных в спектре эквивалентных ширин межзвездных полос, а в работе [17] покраснение определено путем сравнения наблюдаемых цветов (U - B), (B - V) с нормальными цветами стандартных сверхгигантов соответствующего спектрального класса. Таким образом, была получена оценка полного избытка цветов за счет суммарного поглощения в межзвездной среде и в околозвездной оболочке звезды. Столь значительное различие избытка цвета за счет межзвездного и полного поглощения является типичным свойством для роst-AGB звезд в статье Гауба и др. [33].

Используя стандартное значение отношения величины полного поглощения к избытку цвета, R = 3.2, и избыток цвета согласно данным Архиповой и др. [17] получаем для LS III +52°24 полное поглощение $A_v = 2.11^m$. Имея надежное значение расстояния до звезды (d = 5.8 кпк) и полное поглощение, а также используя значение



Рис. 6. Профиль триплета OI 7775 Å в спектрах LS III +52°24, полученных 29.08.2020 (синяя линия) и 26.10.2020 (черная линия).

эффективной температуры $T_{\rm eff} = 24000$ К из работы [16] и соответствующую этой температуре болометрическую поправку В.С., $= -2.5^m$, можем оценить болометрическую звездную величину $M_{\rm bol} = -5.9^m$ и светимость звезды $\lg L/L_{\odot} = 4.27$. Светимость на основе параллакса из [27] несколько ниже: $\lg L/L_{\odot} = 4.18$. С учетом неопределенности эффективной температуры в 1000 К в работе [16], приходим к среднему значению светимости $\lg L/L_{\odot} = 4.2 \pm 0.3$.

Данные из статьи Партасарати и др. [34] указывают на то, что полученная нами светимость LS III +52°24 является типичной для post-AGB звезды. Необходимо учитывать, что Партасарати и др. [34] для оценки параметров для выборки post-AGB применили параллаксы звезд из Gaia DR2 и привели только нижнюю границу оценки светимости для LS III +52°24. Следует отметить, что реальная светимость LS III +52°24 может быть несколько ниже, если учесть, что видимый блеск звезды усилен за счет присутствия в ее спектре мощных эмиссий. Полученная нами светимость $\lg L/L_{\odot} = 4.2 \pm 0.3$ служит дополнительным указанием на то, что звезда не принадлежит к сверхгигантам с феноменом B[е], светимость которых существенно выше. По данным [35], для выборки сверхгигантов этого типа в Галактике средняя светимость составляет $\lg L/L_{\odot} = 5.1 \pm 0.2$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Обнаруженная переменность абсорбционноэмиссионных профилей HI и HeI линий в спектре LS III +52°24 свидетельствует о неоднородности и наличии структуры в ее околозвездной газовой среде. Эта неоднородность и отсутствие сфе-



Рис. 7. Многокомпонентный профиль линии NaI 5889 Å в спектрах LS III +52°24, полученных 29.08.2020 (черная линия) и 26.10.2020 (красная линия). Две вертикальные черты соответствуют скоростям межзвездных компонентов линии KI 7696 Å.

рической симметрии зафиксированы также на изображениях IRAS 22023 + 5249 в ближнем ИК-диапазоне, полученных Гледхиллом и Форде [36] с аппаратурой NIFS 8.2-м телескопа Gemini North. Спектр протяженной газовой оболочки содержит богатый спектр молекулярного водорода, эмиссии HI и HeI имеют профили типа Р Суд. Особенно информативно изображение в полосе Bry, где, как подчеркивают авторы, присутствуют мощный центральный эмиссионный пик, дополнительная эллиптическая оболочка, а также яркие пятна и искривленные детали. Столь структурированная околозведная среда может также объяснить появление и переменность дополнительной эмиссии в длинноволновом крыле профиля Нα на рис. 2.

Неожиданным свойством сверхгиганта LS III +52°24 является его высокая системная скорость,

 $V_{\rm sys} = -149.6 \pm 0.7$ км/с. Эта особенность является решающим доводом о принадлежности звезды к старому населению Галактики. Однако эта высокая скорость согласуется с большой удаленностью звезды, d > 5.3 кпк, полученной на основании ее достаточно надежного параллакса согласно данным Gaia DR3. Привлекая картографию лучевых скоростей в Галактике [37], можно видеть, что значение системной скорости для LS III +52°24 (галактические координаты $l \approx 100^\circ$, $b \approx -2^\circ$) и ее большая удаленность хорошо сочетаются с принадлежностью звезды к пространству далее рукава Scutum–Crux.

В семействе горячих post-AGB звезд имеются иные объекты с подобными большими скоростями. К примеру, Иконникова и др. [26] определили значительную гелиоцентрическую скорость $V_{\odot} = -124.2 \pm 0.4$ км/с для горячей post-AGB

звезды LS 5112 (= IRAS 18379-1707). Совокупность фундаментальных параметров и спектральных особенностей LS 5112, полученных Иконниковой и др. [26], поволяет рассматривать эту звезду в качестве ближайшего аналога LS III +52°24. Важным результатом этих авторов мы рассматриваем выявленный избыток гелия и CNO-элементов, что прямо указывает на стадию post-AGB и эффективность состоявшегося 3-го вычерпывания. К сожалению, нет возможности сопоставить поведение со временем спектральных особенностей LS 5112 и LS III +52°24, поскольку исследование спектра LS 5112 было проведено Иконниковой и др. [26] по единичному наблюдению. Родственным объектом является и горячая post-AGB звезда LS II +34°26 = V886 Her (= IRAS 18062+2410), для которой Архипова и др. [38] выявили фотометрическую переменность той же амплитуды, отождествили множество запрешенных эмиссий, а также ветровые компоненты HeI. Ближайшим родственником этой звезды является горячий В-сверхгигант LS II +34°26 (=V1853 Cyg), в спектре которого Архипова и др. [39] отождествили множество оболочечных эмиссий и зафиксировали скорость системы около $-49 \pm 5 \text{ km/c}$.

Как было отмечено во Введении, ранее Саркар и др. [16] детально исследовали оптический спектр высокого разрешения LS III +52°24. Эти авторы впервые определили ее фундаментальные параметры, особенности химического состава ее атмосферы, нашли высокую лучевую скорость по абсорбционным линиям, $V_{\odot} = -148.31 \pm 0.60$ км/с, и зафиксировали статус звезды как O-rich post-AGB. Но и в этой работе было использовано единичное наблюдение. По-видимому, в семействе горячих post-AGB звезд поведение оптического спектра от времени изучено на основе наблюдений с высоким спектральным разрешением к настоящему времени проведено лишь для IRAS 01005+7910 [20, 28], расположенного в Галактике несколько ближе согласно его надежному параллаксу $\pi = 0.2414 \pm 0.0176$ mas из Gaia DR3.

Отметим, что перечисленные особенности оптического спектра LS III +52°24 (мощные эмиссии линий HI, HeI с переменностью в профилях, наличие запрещенных эмиссий ионов легких металлов), а также положение вблизи плоскости Галактики (галактическая широта $b = -1.96^{\circ}$) позволяют заподозрить принадлежность этой звезды к семейству сверхгигантов с феноменом B[e], принципиальные признаки спектров которых указаны Ламерсом и др. [40]. Хорошим примером сверхгиганта с феноменом B[e] может служить MWC 17 – удаленная на несколько килопарсек горячая звезда в системе источника IRAS 01441+ 6026 вблизи плоскости Галактики. Как показали Клочкова и Ченцов [41], оптический спектр

Таблица 2. Эквивалентные ширины DIBs в спектре LS III +52°24

λ, Å	W_{λ}, m Å	E(B-V), mag
5780.48	334	0.56
5797.06	58	0.29
6195.98	22	0.33
6283.84	496	0.55
6379.32	17	0.15
6613.62	62	0.24
6660.71	19	0.40
7224.03	132	0.53

Примечание. В 3-м столбце указаны соответствующие избытки цвета, полученные с использованием калибровок Коса и Цвиттера [30], курсивом выделены значения согласно калибровкам Луна и др. [31].

МWC 17 содержит мощные эмиссии HI, насыщен интенсивными запрещенными и разрешенными эмиссиями металлов, при этом звездные абсорбции отсутствуют вовсе, за исключением межзвездных абсорбций D-линий NaI и DIBs. Однако полная совокупность имеющихся данных для LS III +52°24 (невысокая абсолютная светимость, особенности химического состава согласно данным [16] и высокая лучевая скорость) соответствует статусу горячей post-AGB звезды. Таким образом, спектр сверхгиганта LS III +52°24 служит примером проявления спектральной мимикрии сверхгигантов. Более подробно этот феномен был ранее рассмотрен Клочковой и Ченцовым [42].

Мощная эмиссия Но в спектре LS III +52°24 в 65-77 раз превышает уровень локального континуума. Столь мощная эмиссия в Нα – уникальное явление для маломассивных сверхгигантов. Как следует из статей Клочковой и др. [20, 28], Архиповой и др. [38], Иконниковой и др. [26] в спектрах ближайших аналогов - горячих центральных post-AGB звезд в системах ИК-источников IRAS 01005 + 7910, IRAS 18062 + 241 и IRAS 18379-1707 - интенсивность эмиссии в Нα на порядок ниже. Даже в спектрах сверхгигантов с В[е] феноменом эмиссия в На также существенно ниже (см. примеры профилей в спектрах сверхгигантов с феноменом В[е] в публикациях [41, 43]). Столь мощную эмиссиию Нα скорее можно видеть в спектрах звезд предельно высокой светимости, например, в спектрах LBV. Однако и в спектре звезды No 12 в ассоциации Суд OB2 – известного кандидата в LBV – интенсивность Нα многократно ниже наблюдаемой в спектре LS III +52°24, светимость которой гораздо ниже. Повидимому, это явление обусловлено значимостью вклада околозвездной газовой среды и имеет отношение к проблеме спектральной мимикрии сверхгигантов [42]. Отсутствие избытка потока в ближнем ИК-диапазоне и высокая системная скорость, $V_{sys} \approx -150$ км/с, определенная нами, подтверждают вывод Саркара и др. [16] о принадлежности LS III +52°24 к типу маломассивных сверхгигантов на стадии post-AGB, приближающихся к фазе планетарной туманности.

Основными новыми результатами, полученными за счет многократных наблюдений В-сверхгиганта LS III +52°24 (= IRAS 22023 + 5249) с высоким спектральным разрешением в широком интервале длин волн в 2010–2021 гг., мы считаем следующие:

• надежная фиксация системной скорости LS III +52°24 по стационарным эмиссиям в ее спектре: $V_{\rm sys} = -149.6 \pm 0.7$ км/с;

• вывод о значительной удаленности звезды, $d \approx 5.3$ кпк;

• обнаружение переменности и стратификации скорости в протяженной атмосфере и в газовой оболочке. Положение ветровой абсорбции меняет положение в интервале от $V_{\odot} = -270$ до -290 км/с. Скорость ветра достигает 150 км/с;

• обнаружение переменности во времени лучевой скорости по положениям фотосферных абсорбций ионов NII, OII в интервале от $V_{\odot} = -127.2$ до -178.3 км/с, что указывает на присутствие компонента или пульсаций в атмосфере;

• обнаружение переменности профиля ИКтриплета кислорода OI 7775 Å, обусловленной появлением нестабильной эмиссии.

Очевидно, что для выяснения причины и определения параметров обнаруженной переменности лучевой скорости и профилей линий необходим дальнейший спектральный мониторинг LS III +52°24 с высоким спектральным разрешением.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

ВГК, выполнившая анализ спектров и кинематических данных для системы LS III +52°24, благодарит за поддержку Российский научный фонд (грант No. 22-22-00043¹). Наблюдения на телескопах САО РАН выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение No. 05.619.21.0016, идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

БЛАГОДАРНОСТИ

В исследовании использованы базы астрономических данных SIMBAD, VALD, SAO/NASA ADS и Gaia DR3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. S. R. Pottash and M. Parthasarathy, Astron. and Astrophys. **192**, 182 (1998).
- 2. B. J. Hrivnak, K. Volk, and S. Kwok, Astrophys. J. 694, 1147 (2009).
- R. D. Oudmaijer, W. E. C. J. van der Veen, L. B. F. M. Waters, N. R. Trams, C. Waelkens, and E. Engelsman, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 96, 625 (1992).
- 4. *R. D. Oudmaijer*, Astron. and Astrophys. **306**, 823 (1996).
- 5. S. Kwok, Astron. and Astrophys. Rev. 31, 63 (1993).
- 6. V. G. Klochkova, Bull. SAO 44, 5 (1999).
- 7. V. G. Klochkova, Astrophys. Bull. 69, 279 (2014).
- 8. V. G. Klochkova, Astrophys. Bull. 74, 475 (2019).
- 9. T. Blöcker, Astron. and Astrophys. 297, 727 (1995).
- 10. F. Herwig, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 43, 435 (2005).
- M. Di Criscienzo, P. Ventura, D. A Garca-Hernández, F. DellAgli, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 462, 395 (2016).
- N. Liu, R. Gallino, S. Bisterzo, A. M. Davis, R. Trappitsch, and L. R. Nittler, Astrophys. J. 865, id. 112 (2018).
- M. Parthasarathy, P. Garca-Lario, S. R. Pottasch, A. Manchado, J. Clavel, D. de Martino, G. C. M. van de Steene, and K. C. Sahu, Astron. and Astrophys. 267, L19 (1993).
- 14. J. Hardorp, I. Theile, and H. H. Vogt, Hamburger Sternw., Warner & Swasey Obs. 3 (1964).
- O. Suàrez, P. Garca-Lario, A. Manchado, M. Manteiga, A. Ulla, and S. R. Pottasch, Astron. and Astrophys. 458, 173 (2006).
- G. Sarkar, D. A. Garca-Hernández, M. Parthasarathy, A. Manchado, P. Garca-Lario, and Y. Takeda, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 421, 679 (2012).
- В. П. Архипова, М. А. Бурлак, В. А. Есипов, Н. П. Иконникова, Г. В. Комиссарова, Письма в Астрон. журн. 39, 695 (2013).
- 18. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин, Астрон. журн. **94**, 808 (2017).
- 19. *М. В. Юшкин, В. Г. Клочкова*, Препринт, № 206, Специальная Астрофизическая Обсерватория, Нижний Архыз (2005).
- V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, A. S. Miroshnichenko, V. E. Panchuk, and K. S. Bjorkman, Astron. and Astrophys. **392**, 143 (2002).
- 21. G. Sarkar, M. Parthasarathy, and B. E. Reddy, Astron. and Astrophys. 431, 1007 (2005).
- T. Ryabchikova, N. Piskunov, R. L. Kurucz, H. C. Stempels, U. Heiter, Yu. Pakhomov, and P. S. Barklem, Physica Scripta 90(5), id. 054005 (2015).
- 23. Yu. V. Pakhomov, T. A. Ryabchikova, and N. E. Piskunov, Astron. Rep. 63, 1010 (2019).
- P. Garca-Lario, M. Parthasarathy, D. de Martino, L. Sanz Fernandez de Cordoba, R. Monier, A. Manchado, and S. R. Pottasch, Astron. and Astrophys. 326, 11037 (1997).
- 25. M. Mello, S. Dafton, C. B. Pereira, and I. Hubeny, Astron. and Astrophys. 543, id. All (2012).

¹ https://rscf.ru/project/22-22-00043/

- N. P. Ikonnikova, M. Parthasarathy, A. V. Dodin, S. Hubrig, and G. Sarkar, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 491, 4828 (2020).
- 27. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner, and R. Andrae, Astron. J. **161**(3), 147 (2021).
- V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, E. G. Sendzikas, and M. V. Yushkin, Astrophys. Bull. 69, 439 (2014).
- 29. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, Н. С. Таволжанская, Астрон. журн. 87, 263 (2010).
- 30. J. Kos and T. Zwitter, Astrophys. J. 774, id. 72 (2013).
- R. Luna, R. N. L. J. Cox, M. A. Satorre, D. A. Garca Hernández, O. Suárez, P. Garca-Lario, Astron. and Astrophys. 480(1), 133 (2008).
- 32. G. M. Green, E. Schlafly, C. Zucker, J. S. Speagle, and D. Finkbeiner, Astrophys. J. **887**(1), id. 93 (2019).
- 33. G. Gauba, M. Parthasarathy, B. Kumar, R. K. S. Yadav, and R. Sagar, Astron. and Astrophys. 404, 305 (2003).
- 34. M. Parthasarathy, T. Matsuno, and W. Aoki, Publ. Astron. Soc. Japan 72(6), 99 (2020).

- 35. A. S. Miroshnichenko, Astrophys. J. 667, 497 (2007).
- T. M. Gledhill and K. P. Forde, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 447, 1080 (2015).
- 37. J. P. Vallee, Astron. J. 135, 1310 (2008).
- 38. *В. П. Архипова, В. Г. Клочкова, Г. В. Сокол*, Письма в Астрон. журн. **27**, 122 (2001).
- 39. В. П. Архипова, Н. П. Иконникова, Р. И. Носкова, Г. В. Комиссарова, В. Г. Клочкова, В. Ф. Есипов, Письма в Астрон. журн. 27, 719 (2001).
- H. J. G. L. M. Lamers, F. J. Zickgraf, D. de Winter, L. Houziaux, and J. Zorec, Astron. and Astrophys. 340, 117 (1998).
- 41. *V. G. Klochkova and E. L. Chentsov*, Astrophys. Bull. **71**, 33 (2016).
- 42. В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов, Астрон. журн. 95, 22 (2018).
- 43. A. S. Miroshnichenko, E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, S. V. Zharikov, et al., Astrophys. J. **700**, 209 (2009).