

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ post-AGB СВЕРХГИГАНТА V340 Ser (=IRAS 17279–1119)

© 2020 г. В. Г. Клочкова^{1*}, В. Е. Панчук¹, Н. С. Таволжанская¹, М. В. Юшкин¹

¹ Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

Поступила в редакцию 03.06.2020 г.

После доработки 18.06.2020 г.; принята к публикации 25.06.2020 г.

В спектрах сверхгиганта V340 Ser (=IRAS 17279–1119), полученных на 6-м телескопе БТА с разрешением $R \geq 60\,000$, найдены признаки переменности ветра и стратификации скорости в протяженной атмосфере. Линия H α имеет профиль типа P Cyg, абсорбционная компонента которого ($V_{\odot} = +34$ км/с) формируется в верхних слоях расширяющейся атмосферы, близких к околозвездной среде. Для четырех дат по положениям от 300 до 550 симметричных абсорбций металлов с точностью лучше ± 0.1 км/с получена средняя скорость: $V_{\odot} = 59.30, 60.09, 58.46, 55.78$ км/с. Множество низко-возбужденных линий металлов имеют профиль типа обратного P Cyg. Среднее положение их эмиссионных компонент, $V_{\odot} = 46.3 \pm 0.4$ км/с, систематически отличается от скорости по симметричным абсорбциям, что указывает на наличие градиента скорости в протяженной атмосфере сверхгиганта. Многокомпонентный профиль D-линий NaI содержит: межзвездную $V_{\odot} = -11.2$ км/с, околозвездную $V_{\odot} = +10$ км/с, и компоненту $V_{\odot} = +34.0$ км/с, формирующуюся в верхних слоях атмосферы. Средняя скорость по 20–30 отождествленным в спектрах диффузным межзвездным полосам (DIBs), $V_{\odot}(\text{DIBs}) = -11.6 \pm 0.2$ км/с, согласуется со скоростью по межзвездным компонентам NaI и KI. Эквивалентная ширина триплета кислорода W(OI 7774) = 1.25 Å соответствует абсолютной величине звезды $M_V \approx -4.6^m$, что с учетом полного (межзвездное + околозвездное) поглощения приводит к расстоянию до звезды $d \approx 2.3$ кпк.

Ключевые слова: звезды, эволюция, post-AGB звезды, атмосферы, нуклеосинтез, оболочки, оптические спектры.

DOI: 10.31857/S032001082008001X

1. ВВЕДЕНИЕ

V340 Ser — центральная звезда инфракрасного источника IRAS 17279–1119 — была внесена в список звезд с избытками ИК-потока Оудмайером и др. (1992). Позже Седмиак и др. (2008), изучив для большой выборки инфракрасных источников данные, полученные с космическим телескопом Хаббла, указали на точечный характер изображения IRAS 17279–1119 и отнесли V340 Ser к звездам на стадии после асимптотической ветви гигантов (далее в тексте post-AGB). Эти авторы отметили наличие избытка потока в ближнем ИК-диапазоне, что свидетельствует о присутствии тепловой околозвездной пыли.

На стадии post-AGB наблюдаются далеко эволюционировавшие звезды с исходными массами в интервале 2–8 M_{\odot} . Согласно Блекеру (1995а), на предшествующей эволюционной стадии AGB эти звезды наблюдаются в виде красных

сверхгигантов с эффективной температурой $T_{\text{eff}} \approx 3000\text{--}4500$ К. AGB-стадия для звезд вышеуказанных масс является заключительной фазой с нуклеосинтезом в звездных ядрах. Интерес к AGB-звездам и к их ближайшим потомкам обусловлен прежде всего 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 3–4 M_{\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. Исходными ядрами для цепочки реакций s-процесса служат ядра Fe. У звезд с исходной массой ниже 3–4 M_{\odot} необходимый поток нейтронов обеспечивает реакция $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, а в случае более массивных звезд, с

* Электронный адрес: valenta@sao.ru

начальными массами более $4\text{--}5 M_{\odot}$, аналогичная реакция идет на ядрах ^{22}Ne . Подчеркнем, что эти более массивные AGB звезды могут быть также источниками лития. Детали эволюции звезд вблизи AGB и результаты современных расчетов синтеза и выноса элементов приведены в статьях Хервига (2005), Крищенко и др. (2016), Лью и др. (2018).

В базе данных SIMBAD для сверхгиганта V340 Ser приведен спектральный класс F2–3 II. Этот сверхгигант находится вне плоскости Галактики, что уже указывает на его вероятную принадлежность к немассивным проэволюционировавшим звездам. К настоящему времени звезда изучена как фотометрическими, так спектральными методами. Ряд авторов (в частности, Казаровец и др. 2000; де Смедт и др. 2016) относят V340 Ser к переменным типа RV Tau. Post-AGB звезды этой разновидности расположены на диаграмме G–P в полосе нестабильности (или вблизи нее), имеют избытки ИК-потока в ближней ИК-области, что служит признаком наличия теплой околозвездной пыли, еще не отделившейся от фотосферных слоев звезды.

Распространенность химических элементов в атмосфере V340 Ser изучена неоднократно и достаточно надежно. Ферро и др. (2001) по спектрам высокого разрешения, но с умеренным отношением S/N получили параметры модели атмосферы для этой звезды: $T_{\text{eff}} = 7300$ К, ускорение силы тяжести $\log g = 1.25$ и микротурбулентную скорость $\xi_t = 4.6$ км/с. Они нашли пониженную металличность $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -0.60$, повышенное содержание тяжелых металлов s-процесса, отношение содержания углерода к кислороду $\text{C}/\text{O} \approx 1$. В итоге эти авторы поддержали более ранний вывод (ван Винкель, 1997) о принадлежности звезды к post-AGB звездам, прошедшим третье перемешивание. Работа Ферро и др. (2001) важна еще и тем, что ее авторы отметили отсутствие эффекта селективного осаждения химических элементов в атмосфере этой звезды, который обычно искажает распространенность элементов в атмосферах родственных post-AGB звезд (см. примеры в статьях Клочковой (1995), Гириджара и др. (2000), Рао и др. (2012), Клочковой и Таволжанской (2019)).

Рао и др. (2012) по спектрам высокого разрешения определили параметры модели и детальный химический состав атмосферы для выборки post-AGB звезд, включая и V340 Ser. Принятые ими параметры модели для этой звезды: $T_{\text{eff}} = 7300 \pm 150$ К, ускорение силы тяжести $\log g = 2.25 \pm 0.25$ и микротурбулентная скорость $\xi_t = 4.7 \pm 0.25$ км/с, в пределах точности согласуются с полученными ранее параметрами из работы Ферро и др. (2001). При пониженной металличности

$[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -0.60$ для V340 Ser найден нетривиальный химический состав атмосферы, а именно: умеренные, но значимые избытки элементов α -процесса, $[\alpha/\text{Fe}] = +0.44$, и тяжелых металлов s-процесса, $[\text{s}/\text{Fe}] = +0.69$. Позже де Смедт и др. (2016), используя спектры телескопа VLT в сочетании со спектрографом UVES, вновь подтвердили параметры и особенности химического состава V340 Ser. Основная цель их исследования — поиск признаков наличия свинца в атмосферах изучаемых звезд — не была достигнута, поскольку для 14 post-AGB звезд с обогащенными тяжелыми металлами атмосферами авторы получили лишь верхние пределы содержания этого элемента. В нашем исследовании оптических спектров V340 Ser работа этих авторов важна, потому что, проведя спектральный мониторинг со спектрографом HERMES 1.2-м телескопа, де Смедт и др. (2016) пришли к выводу о двойственности этой звезды, определив орбитальные параметры. Найденный ими период составляет $P = 365$ дней, системная скорость $\gamma = 56.8 \pm 0.5$ км/с, амплитуда переменности скорости $\Delta Vr = 7.92 \pm 0.44$ км/с.

Поведение фотометрических параметров V340 Ser также надежно изучено. Архипова и др. (2011), выполнив 7-летний UVB-мониторинг звезды, пришли к выводу о переменности блеска с типичной для post-AGB звезд амплитудой $\Delta V \approx 0^m.2$ и основным периодом $P = 89^d.6$. Присоединив к анализу более равномерно распределенные во времени данные автоматического обзора ASAS, Архипова и др. (2011) определили амплитуду $\Delta V \approx 0^m.3$ и основной период $P = 89^d.8$.

В данной статье мы представляем результаты анализа оптических спектров V340 Ser, полученных на 6-м телескопе БТА в 2018–2020 гг. Основная цель нашей работы — поиск особенностей спектра и их переменности со временем. В разделе 2 статьи кратко описаны методы наблюдений и анализа данных. В разделе 3 мы приводим результаты, сопоставляя их с опубликованными ранее, и в разделе 4 приводим выводы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Спектры V340 Ser получены с эшелльным спектрографом НЭС (Панчук и др. 2017), стационарно расположенным в фокусе Нэсмита 6-м телескопа БТА. Моменты наблюдений звезды указаны в табл. 1. В эти даты эшелльный спектрограф НЭС был оснащен крупноформатной ПЗС-матрицей форматом 4608×2048 элементов с размером пикселя 0.0135×0.0135 мм, шум считывания

Таблица 1. Результаты измерений гелиоцентрической лучевой скорости V_{\odot} в спектрах V340 Ser по наборам линий различного типа. Число использованных деталей различных типов указано в скобках. Для D-линий NaI указано положение абсорбционных компонентов, формирующихся вне звездной атмосферы

| JD-2458000 | V_{\odot} , км/с | | | | | | |
|------------|---------------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------|-------|-------------------------|
| | Абсорбции металлов | Эмиссии металлов | H α (abs) H α (em) | H β | NaI | KI | DIBs |
| 213.5 | 59.30 ± 0.05 (557) | 45.0 ± 0.2 (59) | 34.2 101.7 | 53.6 | -11.3, 10.0, 33.7 | -9.2 | -11.9 ± 0.2 (23) |
| 220.4 | 60.09 ± 0.05 (459) | 46.0 ± 0.3 (43) | 34.9 100.1 | 54.8 | -11.2, 10.2, 33.4 | -10.0 | -11.3 ± 0.2 (32) |
| 574.4 | 58.46 ± 0.06 (283) | 48.0 ± 0.4 (49) | 34.5 101.2 | 53.9 | -11.4, 10.3, 35.0 | -10.7 | -12.1 ± 0.3 (18) |
| 924.2 | 55.78 ± 0.06 (408) | 46.0 ± 0.3 (28) | 33.6 97.5 | 49.3 | -11.1, 9.1, 32.8 | -9.3 | -11.3 ± 0.3 (15) |

1.8 e⁻. 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 трижды со смещением вдоль дисперсии эшелле-решетки. Спектральное разрешение составляет $\lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$, отношение сигнала к уровню шумов $S/N > 100$, вдоль эшеллевого порядка меняется от 100 до 150.

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 (2005). Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух спектров, полученных последовательно один за другим. Калибровка по длинам волн осуществлялась по спектрам Th-Ag лампы с полым катодом. Вся дальнейшая обработка, включающая фотометрические и позиционные измерения, выполнена с помощью современной версии программы DECH20t, разработанной Г. Галазутдиновым (1992). Отметим, что эта традиционно используемая нами программа обработки спектров позволяет измерять лучевые скорости для отдельных деталей профилей линий. Систематические ошибки измерения гелиоцентрических скоростей V_{\odot} , оцененные по резким межзвездным компонентам NaI, не превышают 0.25 км/с (по одной линии), случайные ошибки для неглубоких абсорбций ≈ 0.5 км/с — среднее значение на одну линию. Тем самым для усредненных

величин V_{\odot} в табл. 1 случайные ошибки 0.05–0.3 км/с в зависимости от числа измеренных линий. Отождествление деталей в спектре V340 Ser мы проводили, используя опубликованный Клочковой и др. (2007a) атлас оптического спектра канонической post-AGB звезды HD 56126 (=IRAS 07134+1005, Sp = F5 Iab), базирующийся на наблюдательных данных 6-м телескопа в сочетании со спектрографом НЭС.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Особенности оптического спектра V340 Ser и стратификация лучевых скоростей

Спектральные аномалии, присущие звездам типа RV Tau, — это эмиссионные компоненты сложных и переменных с фазой профилей H α , эмиссия HeI 5876 Å, раздвоение избранных абсорбций, многокомпонентные профили D-линий дублета NaI, а также слабые эмиссии металлов, появляющиеся в отдельные моменты цикла. Примерами служат спектры звезд-прототипов RV Tau, U Mon и AC Her, изученных Бэйрдом (1982, 1984), Поллардом и др. (1997), Клочковой и Панчуком (1998), Киппером и Клочковой (2013). В зарегистрированных нами спектрах V340 Ser отсутствуют и раздвоение абсорбций, и эмиссия в линии HeI 5876 Å. Оптический спектр этой звезды, в основном соответствующий ожидаемому спектру F2–3 сверхгиганта, содержит при этом некоторые из перечисленных выше особенностей. Во-первых, профиль H α является комплексным, что типично для post-AGB звезд. Представленный на рис. 1 профиль этой линии в координатах “Относительная интенсивность” — “Лучевая скорость” включает широкие абсорбционные крылья, на которые

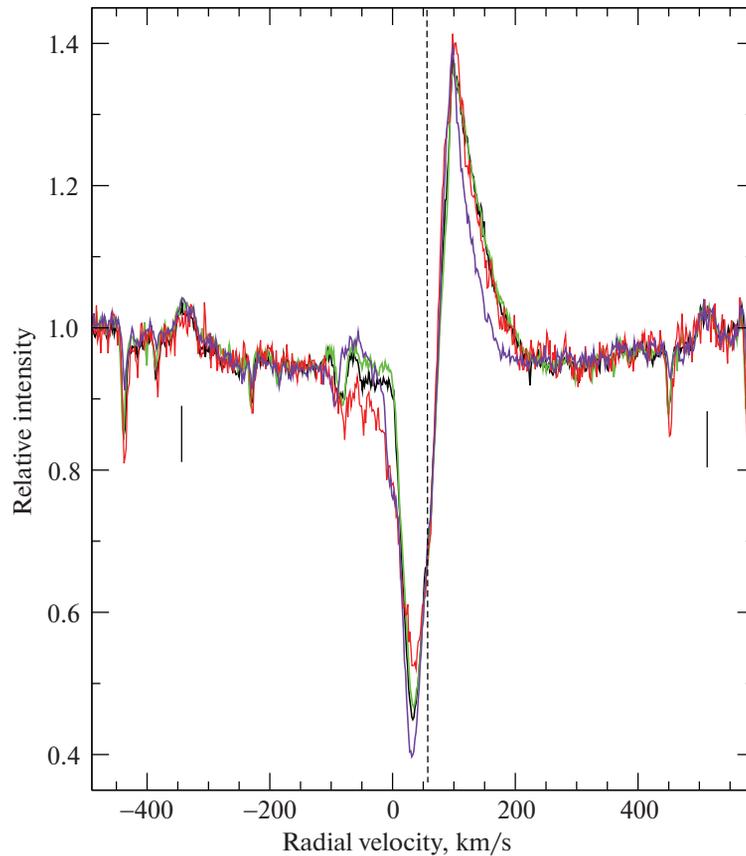


Рис. 1. Профиль $H\alpha$ в координатах “Лучевая скорость — относительная интенсивность” в спектрах V340 Ser, полученных в разные даты: 05.04.2018 — черная линия, 11.04.2018 — зеленая, 31.03.2019 — красная, 02.04.2020 — индиго. Две сплошные вертикали указывают положения эмиссий TiI 6554.23 Å и CaI 6572.80 Å. Вертикальной линией отмечена системная скорость $\gamma = 56.8 \pm 0.5$ км/с, согласно де Смедту и др. (2016).

налагаются абсорбционная и эмиссионная компоненты. Как следует из рис. 1, положения обеих компонент не изменяются со временем, однако можно отметить слабую переменность их интенсивности. Более заметно изменение формы коротковолнового крыла абсорбционного компонента, что отражает изменение скорости истечения. Подчеркнем большое различие скоростей, соответствующих ядрам эмиссионного и абсорбционного компонентов профиля $H\alpha$. Как видно из данных табл. 1 и рис. 1, это различие составляет около 65 км/с и многократно превышает этот же параметр для звезд типа RV Tau, изученных Поллардом и др. (1997), включая и звезду AD Aql, в спектре которой тип профиля $H\alpha$ близок к зарегистрированному нами в спектре V340 Ser. При этом, как видно на рис. 2, профиль $H\beta$ чисто абсорбционный, видимых эмиссионных деталей он не содержит. Как следует из табл. 1, положение ядра $H\beta$ не вполне совпадает с положением атмосферных абсорбций металлов, оно сдвинуто на 5–6 км/с в коротковолновую область, что свидетельствует о стратификации картины скоростей.

Околосветные оболочки проэволюциониро-

вавших звезд зачастую являются источниками молекулярного и мазерного излучения, что позволяет надежно фиксировать их системную скорость. Однако для V340 Ser нет сведений о каких-либо оболочечных деталях в радиодиапазоне. Оптический спектр этой звезды также не содержит признаков наличия молекул, поэтому в качестве системной скорости для этой звезды мы используем значение $\gamma = 56.8 \pm 0.5$ км/с, согласно де Смедту и др. (2016).

Во-вторых, профиль $H\alpha$ в спектре V340 Ser на рис. 1 относится к типу P Cyg. Такой тип профиля является типичным для звезд высокой светимости, обладающих протяженной и расширяющейся атмосферой. $H\alpha$ формируется в верхних слоях протяженной атмосферы звезды. Интенсивная абсорбционная компонента — результат поглощения излучения в области перед звездой. Положение ядра абсорбционной компоненты (+34 км/с) указывает на ее формирование в высоких слоях расширяющейся атмосферы, близких к околосветной среде. Скорость около 34 км/с отличается от принятой системной скорости, что указывает на расширение области, в которой эта абсорбция формиру-

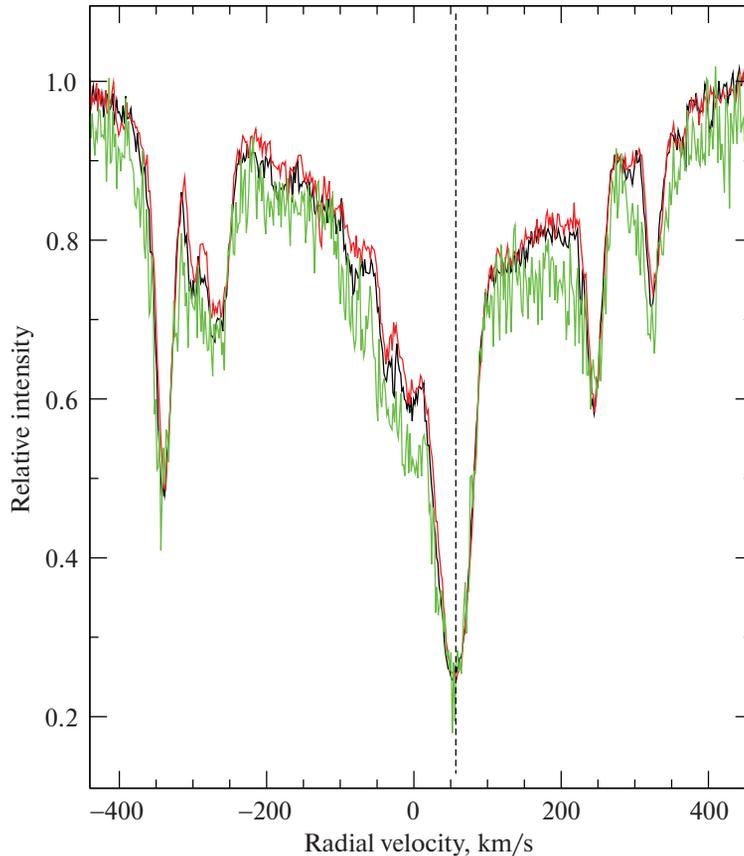


Рис. 2. Профиль $H\beta$ в спектрах V340 Ser, полученных в разные даты: 05.04.2018 — черная линия, 11.04.2018 — зеленая, 31.03.2019 — красная. Вертикальной линией отмечена системная скорость $\gamma = 56.8 \pm 0.5$ км/с, согласно де Сметту и др. (2016).

ется. Подобный тип профиля редко встречается в спектрах post-AGB звезд. В статьях Клочковой (1997), Санчез Контрерас и др. (2008), Молины и др. (2014) приведены многочисленные примеры разновидностей профиля $H\alpha$ в спектрах post-AGB звезд: чисто абсорбционные профили, комплексные профили типа P Cyg, типа обратного P Cyg и др. Однако в этой обширной коллекции зарегистрированных профилей нет подобного профилю $H\alpha$ в спектрах V340 Ser. В статьях Гонзалеса и др. (1997), Полларда и др. (1997), посвященных спектроскопии звезд типа RV Tau, наблюдается разнообразие типов профилей, как и в сообществе post-AGB звезд в целом. Профиль $H\alpha$ с сильной эмиссией, сдвинутой в длинноволновую область, подобный профилю в спектре V340 Ser, встречается редко, но, как было отмечено выше, был ранее зарегистрирован Поллардом и др. (1997) в спектре AD Aql. В спектре этой звезды зарегистрирована значительная фазовая переменность профиля $H\alpha$, включая переменность положений обеих его компонент. Для V340 Ser такой значительной переменности положения и интенсивности компонент профиля $H\alpha$ мы пока не зафиксировали. На рис. 1 заметно изменение лишь протяженности

коротковолнового крыла абсорбции, что отслеживает переменность скорости истечения вещества. Близкий тип профиля $H\alpha$ с большим различием скоростей, >100 км/с, для абсорбционной и эмиссионной компонент наблюдается также в спектре post-AGB звезды 89 Her (=IRAS 17534+2603). Для иллюстрации на рис. 3 показан фрагмент спектра 89 Her, полученный 3.06.2010 с тем же спектрографом НЭС телескопа БТА.

Влияние ветра, искажающее коротковолновые крылья сильных абсорбций SiII(2) 6347 и 6371 Å в спектре V340 Ser, видим на правом фрагменте рис. 4, где также отмечены эмиссия FeI 6359 Å и межзвездные детали (DIBs) $\lambda = 6376$ и 6379 Å. Искажение крыльев абсорбций SiII(2) 6347 и 6371 Å на профилях в координатах “Относительная интенсивность — лучевая скорость” иллюстрирует также рис. 5. Здесь абсорбционные ядра обоих профилей смещены относительно принятой системной скорости, но их положение хорошо согласуется со скоростью по иным абсорбциям металлов в спектре: в табл. 1 для этой даты $V_{\odot}(\text{abs}) = 60.09$ км/с.

Де Сметт и др. (2016), получив кросс-корреляционным методом набор значений луче-

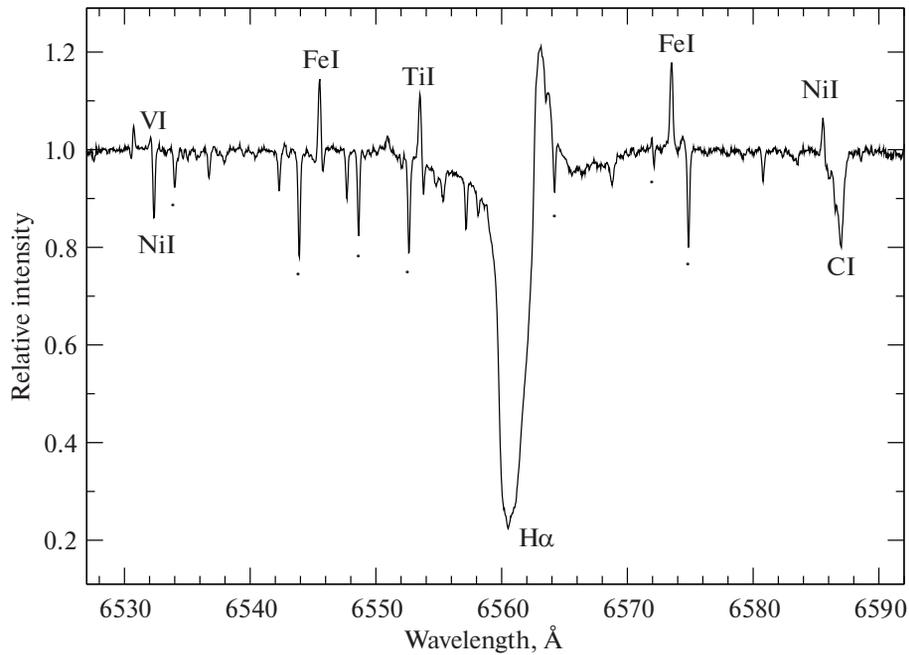


Рис. 3. Фрагмент спектра 89 Her, содержащий H α и эмиссии TiI, VI, FeI и NiI. Указано отождествление основных абсорбций. Точками отмечены теллурические детали.

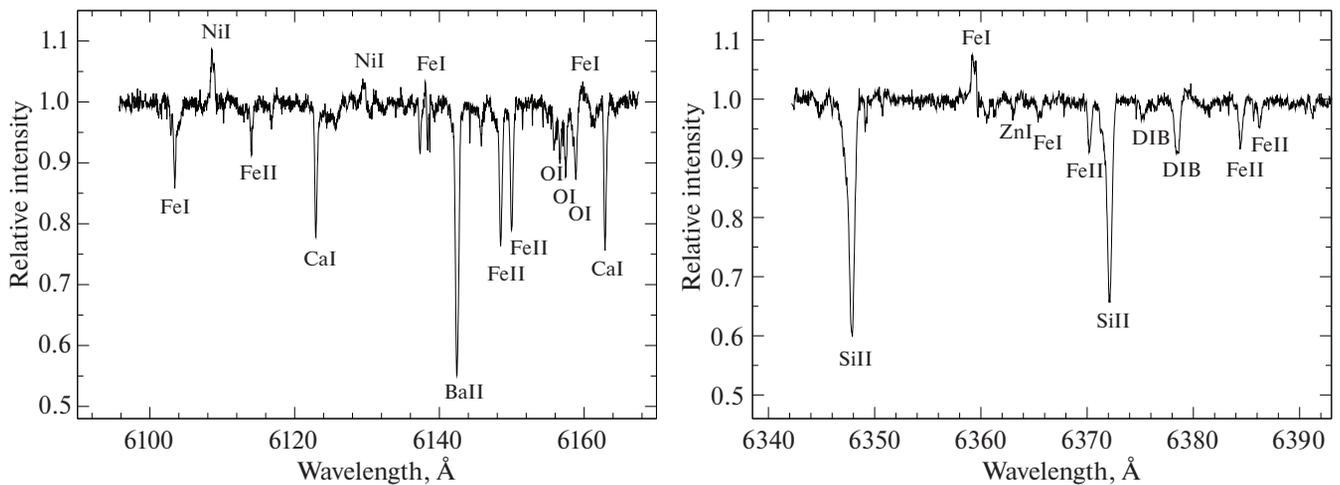


Рис. 4. Фрагменты спектра V340 Ser, содержащие характерные пекулярные детали: эмиссии FeI и NiI, а также сильные абсорбции SiII(2) 6347 и 6371 Å с вытянутым коротковолновым крылом и DIBs на правом фрагменте. Указано отождествление основных деталей.

вой скорости для V340 Ser, пришли к выводу о двойственности звезды и отнесли систему V340 Ser к спектрально-двойным звездам с периодом 365 дней. Позже Оомен и др. (2018), используя ту же методику, уточнили орбитальные элементы для выборки post-AGB звезд в двойных системах. Для V340 Ser они приводят орбитальные элементы: период 363 дня, γ -скорость 56.1 км/с, амплитуда переменности скорости $K = 8.4 \pm \pm 1.0$ км/с. Отметим два момента. Во-первых, имея высококачественные спектры этой звезды, мы не обнаружили признаков спектральной двой-

ственности. Во-вторых, как следует из данных табл. 1, получив спектры V340 Ser в произвольные даты в 2018–2020 гг., мы не зафиксировали переменности лучевой скорости звезды, ожидаемой согласно результатам де Смедта и др. (2016) и Оомена и др. (2018). Учитывая величину периода около года, можно предположить, что все наши спектры получены в близкие фазы орбитального периода. Очевидна необходимость продолжения наблюдений V340 Ser и детального изучения переменности картины скорости.

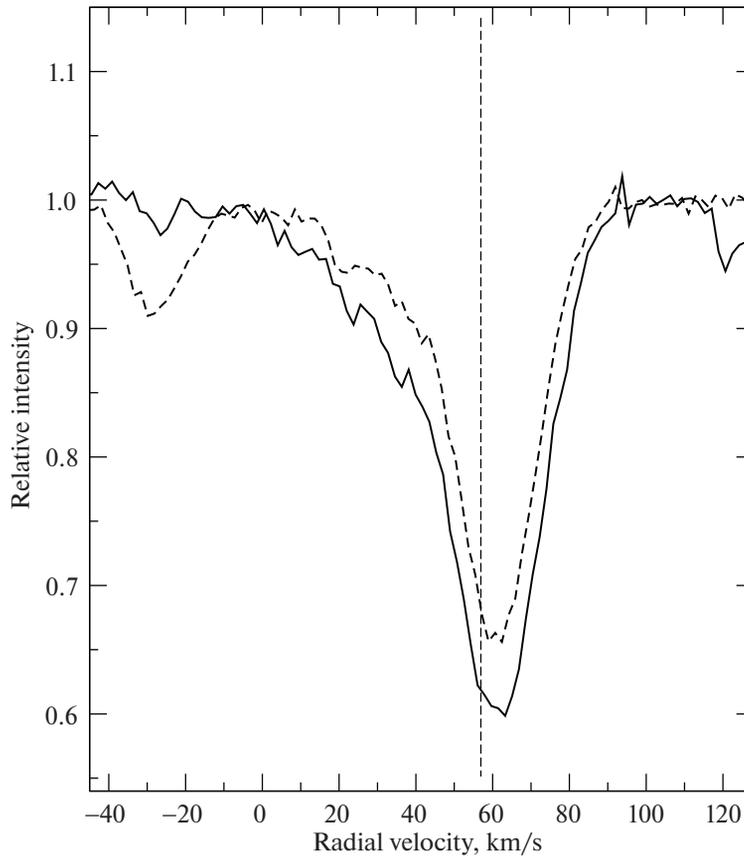


Рис. 5. Профили абсорбций SiII(2) 6347 (сплошная линия) и 6371 Å в спектре V340 Ser за 11.04.2018. Вертикальной линией отмечена системная скорость $\gamma = 56.8 \pm 0.5$ км/с, согласно де Смедту и др. (2016).

3.2. Эмиссии металлов

Спектральные фрагменты на рис. 4 иллюстрируют следующую, не отмеченную ранее в публикациях, особенность оптического спектра V340 Ser — наличие слабых эмиссий нейтральных металлов с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня. Две такие эмиссии на крыльях H α хорошо видны и на рис. 1. В табл. 2 перечислены все такого рода эмиссии, отождествленные нами в зарегистрированном диапазоне длин волн. В последнем столбце этой таблицы приведены значения скорости, соответствующие положению эмиссионной детали. Как следует из данных табл. 1, средняя скорость по эмиссиям незначительно меняется от даты к дате, от $V_{\odot}(\text{em}) = 45.0 \pm 0.2$ до 48.0 ± 0.4 км/с. При этом для каждой даты $V_{\odot}(\text{em})$ систематически отличается на ≥ 10 км/с от средней скорости по абсорбциям, что указывает на наличие стратификации скорости в протяженной атмосфере звезды. Полуширины этих эмиссий, формирующихся во внешних слоях протяженной атмосферы V340 Ser, составляют около 0.25 \AA или $\delta V_{\odot} \approx 10\text{--}12$ км/с, что в 2 раза превышает полуширины запрещенных ионосферных эмиссий [OI] в спектре. Подчеркнем, что эмиссии присут-

ствуют и в нескольких линиях ионов, например, NdII 5102 Å, YII 5509 Å, EuII 6645 Å. Эта особенность может оказать влияние на содержание химических элементов, поэтому ее следует подтвердить в последующих наблюдениях.

Подобные низковозбужденные эмиссии нейтральных металлов были ранее зафиксированы в спектрах post-AGB кандидатов LN Hya (=IRAS 12538–2611) (Клочкова, Панчук, 2012) и V1648 Aql (Клочкова, Таволжанская, 2019), имеющих спектральные классы, близкие к таковому у V340 Ser. В случае LN Hya эмиссии металлов появились в спектрах, полученных в ее активные фазы 2010 г., когда профиль типа обратного P Cyg у линий металлов существенно отличался от наблюдавшегося в спокойные фазы. При этом положение абсорбционной компоненты H α также значительно отличалось от положения в другие моменты наблюдений. Кроме того, ядро H α было существенно (примерно на 15 км/с) сдвинуто в длинноволновую область относительно симметричных абсорбций металлов. Множество низковозбужденных эмиссий содержит и спектр вышеупомянутой post-AGB звезды 89 Her, что уже отмечалось ранее Вотерсом и др. (1993). Для иллюстрации на рис. 3 приведен фрагмент спектра

Таблица 2. Отождествление эмиссий в спектре V340 Ser

| λ , Å | | V_{\odot} , км/с | λ , Å | | V_{\odot} , км/с | λ , Å | | V_{\odot} , км/с |
|---------------|------|--------------------|---------------|-----|--------------------|---------------|-----|--------------------|
| 4953.200 | NiI | 46.20 | 6108.107 | NiI | 48.32 | 6498.950 | FeI | 48.96 |
| 5079.682 | CeII | 45.86 | 6108.530 | Cl | 40.30 | 6531.410 | VI | 47.03 |
| 5092.800 | NdII | 42.86 | 6128.990 | NiI | 42.83 | 6532.890 | FeI | 41.82 |
| 5102.390 | NdII | 42.27 | 6137.691 | FeI | 43.60 | 6546.238 | FeI | 45.25 |
| 5107.446 | FeI | 45.85 | 6191.190 | NiI | 46.14 | 6554.230 | TiI | 46.92 |
| 5150.840 | FeI | 43.08 | 6191.558 | FeI | 45.09 | 6572.800 | CaI | 45.91 |
| 5151.910 | FeI | 45.20 | 6200.313 | FeI | 43.19 | 6574.240 | FeI | 46.57 |
| 5198.710 | FeI | 43.00 | 6213.429 | FeI | 43.55 | 6592.913 | FeI | 43.03 |
| 5216.270 | FeI | 43.39 | 6219.270 | FeI | 44.89 | 6643.629 | NiI | 46.40 |
| 5409.784 | CrI | 42.29 | 6230.722 | FeI | 42.47 | 6677.985 | FeI | 43.14 |
| 5434.523 | FeI | 40.45 | 6261.098 | TiI | 43.08 | 6767.768 | NiI | 43.86 |
| 5462.485 | NiI | 41.89 | 6265.131 | FeI | 45.17 | 6770.960 | CoI | 46.38 |
| 5490.150 | TiI | 44.67 | 6312.240 | TiI | 43.95 | 6814.950 | CoI | 47.39 |
| 5644.140 | TiI | 48.95 | 6330.130 | CrI | 45.75 | 7052.870 | CoI | 46.81 |
| 5711.883 | NiI | 46.81 | 6358.693 | FeI | 48.43 | 7138.910 | TiI | 46.60 |
| 5847.000 | NiI | 47.13 | 6393.600 | FeI | 43.43 | 7291.449 | NiI | 41.72 |
| 5999.040 | TiI | 42.84 | 6400.000 | FeI | 43.00 | 7357.740 | TiI | 47.17 |
| 6007.310 | NiI | 43.97 | 6430.844 | FeI | 44.75 | 7714.308 | NiI | 48.73 |
| 6065.482 | FeI | 44.89 | 6494.980 | FeI | 42.93 | | | |

этой звезды с узкими эмиссиями, полученный со спектрографом НЭС.

Эмиссии атомов металлов в 80-е годы XX в. были зафиксированы и в спектрах звезд типа RV Tau. К вышеупомянутым работам Бэйрда (1982, 1984), Клочковой и Панчука (1998) добавим также работу Боппа (1984), автор которой подчеркнул появление такого рода эмиссий во время глубоких минимумов звезды R Sct, которая также относится к звездам типа RV Tau.

Некоторые эмиссии Fe, Co, Ni из табл. 2 присутствуют и в спектре желтого гипергиганта ρ Cas с протяженной оболочкой (см. детали и необходимые ссылки в статье Клочковой и др. (2018)). Причем в спектре ρ Cas среднее значение скорости по этим эмиссиям незначительно меняется со временем и мало отличается от значения системной скорости гипергиганта. Низкая ширина этих эмиссий в спектре ρ Cas и совпадение скоростей указывают на то, что эти слабые эмиссии формируются во внешней протяженной газовой оболочке, размеры которой существенно превосходят фотометрический радиус звезды. Эмиссионные линии наблюдаются преимущественно в периоды понижения блеска ρ Cas, что может указывать на относительную стабильность

меры эмиссии, наблюдаемой на фоне ослабленного спектра фотосферы.

3.3. Полосы DIBs и многокомпонентный профиль D-линий NaI

В оптическом спектре V340 Ser, несмотря на значительную ее удаленность от плоскости Галактики (галактическая широта звезды $|b| > 12^\circ$), обнаружены многочисленные межзвездные детали. В частности, две такие детали с длинами волн $\lambda = 6376$ и 6379 Å, хорошо видны на правой панели рис. 4. В табл. 3 перечислены все DIBs из известного списка Дженнискенса и Десерта (1994), отождествленные нами и надежно выделенные среди бленд в спектре V340 Ser. Для этих деталей в таблице приведена лучевая скорость, соответствующая положениям полос, и их эквивалентные ширины W_λ .

Высокое качество спектров V340 Ser позволило нам разрешить на компоненты D-линии дублета NaI 5889 и 5895 Å, а также измерить положение межзвездной абсорбции KI 7696 Å. На профиле линий NaI 5889 и 5895 Å в наших спектрах уверенно выделяются индивидуальные абсорбции,

Таблица 3. Параметры межзвездных полос DIBs в спектре V340 Ser

| $\lambda, \text{\AA}$ | V_{\odot} км/с | $W_{\lambda}, \text{m\AA}$ |
|-----------------------|------------------|----------------------------|
| 4984.79 | -11.86 | 23 |
| 4987.42 | -12.70 | 6 |
| 5780.48 | -12.55 | 263 |
| 5797.06 | -12.11 | 49 |
| 5818.75 | -9.61 | 1 |
| 5849.81 | -10.69 | 5 |
| 6195.98 | -11.35 | 36 |
| 6203.05 | -10.18 | 52 |
| 6211.60 | -11.39 | 29 |
| 6269.85 | -11.04 | 12 |
| 6283.84 | -10.27 | 85: |
| 6329.97 | -12.75 | 7 |
| 6376.08 | -12.41 | 18 |
| 6379.32 | -10.40 | 41 |
| 6439.48 | -11.48 | 4 |
| 6445.28 | -13.03 | 7 |
| 6532.10 | -12.14 | 11 |
| 6613.62 | -12.85 | 114 |
| 6632.86 | -11.52 | 9 |
| 6770.05 | -10.20 | 7 |
| 6827.30 | -11.26 | 7 |
| 7224.03 | -10.76 | 9 |
| 7357.20 | -10.48 | 17 |
| 7367.13 | -13.50 | 13 |
| 7581.30 | -10.22 | 3 |
| 7721.85 | -9.80 | 4 |

усредненное положение которых указано в табл. 1 и на рис. 6. Положение длинноволновой абсорбционной компоненты (на этом рисунке как “4”) для каждого момента наблюдений согласуется в пределах указанных выше ошибок со средней скоростью $V_{\odot}(\text{abs})$, измеренной по большому набору абсорбций металлов. Такое совпадение свидетельствует о формировании этой компоненты D-линий NaI дублета в атмосфере звезды.

Согласно данным из табл. 1, положение самой коротковолновой компоненты “1” линий дублета NaI, $V_{\odot} = -11.3$ км/с, стабильно. С учетом ошибок измерений ее положение совпадает с усредненным значением скорости по набору DIBs, отождествленных в спектре, что позволяет утверждать, что

эта компонента дублета NaI формируется в межзвездной среде. На рис. 6 можно видеть различающуюся крутизну крыльев компонентов, что также подтверждает предлагаемую трактовку областей их формирования.

Компоненты “2” и “3” D-линий NaI со скоростями $V_{\odot} = +10.1$ и $+33.7$ км/с смещены в коротковолновую область относительно средней лучевой скорости $V_{\odot}(\text{abs})$ по атмосферным абсорбциям. Естественно предположить, что обе эти компоненты формируются в околозвездной среде и во внешних слоях расширяющейся атмосферы звезды. Компонента со скоростью 10.1 км/с формируется в оболочке, расширяющейся со скоростью, типичной для оболочек post-AGB звезд (см. для сравнения результаты Бэккера и др. 1995, 1997; и Клочковой, 2014). Компонента со скоростью 33.7 км/с формируется в самых верхних слоях звездной атмосферы, переходящих в неотделившуюся от звезды околозвездную среду. Здесь же формируется и абсорбция комплексного профиля H α . Эти слои движутся со скоростью около 23 км/с относительно глубоких слоев атмосферы, где формируются симметричные абсорбции. Многокомпонентный профиль линий дублета NaI также содержит превышающую локальный континуум эмиссионную компоненту “5” на рис. 6. Положение этой эмиссии, $V_{\odot} \approx 104$ км/с, близко к положению эмиссионной компоненты H α .

Следует обратить внимание на соотношение интенсивностей компонент у линий D1 ($\lambda = 5895 \text{ \AA}$) и D2 ($\lambda = 5889 \text{ \AA}$) дублета NaI. Если соответствующие уровни атома NaI заселяются пропорционально статистическим весам, то в эмиссионном спектре соотношение интенсивностей D2/D1 должно быть равно 2. В спектрах V340 Ser эмиссионная деталь “5” уверенно просматривается в линии D2 и находится на пределе обнаружения в линии D1. При увеличении концентрации атомов NaI возрастает роль процессов резонансного рассеяния и самопоглощения, в результате соотношение интенсивностей линий эмиссии дублета NaI будет стремиться к 1. В спектрах звездных атмосфер мы наблюдаем абсорбции D1 и D2 равной интенсивности (например, компоненты “4” на рис. 6). Аналогичная картина наблюдается, как правило, и в спектрах МЗС (например, компоненты “1” на рис. 6), что свидетельствует о насыщении абсорбционных профилей “4” и “1” дублета NaI за счет самопоглощения. В спектре околозвездных оболочек V340 Ser соотношение интенсивностей абсорбционных компонент дублета значительно различается: ≈ 1.3 и 1.5 для компонент “2” и “3” соответственно. Приходим к выводу, что как для эмиссионной детали “5”, так и для абсорбционных

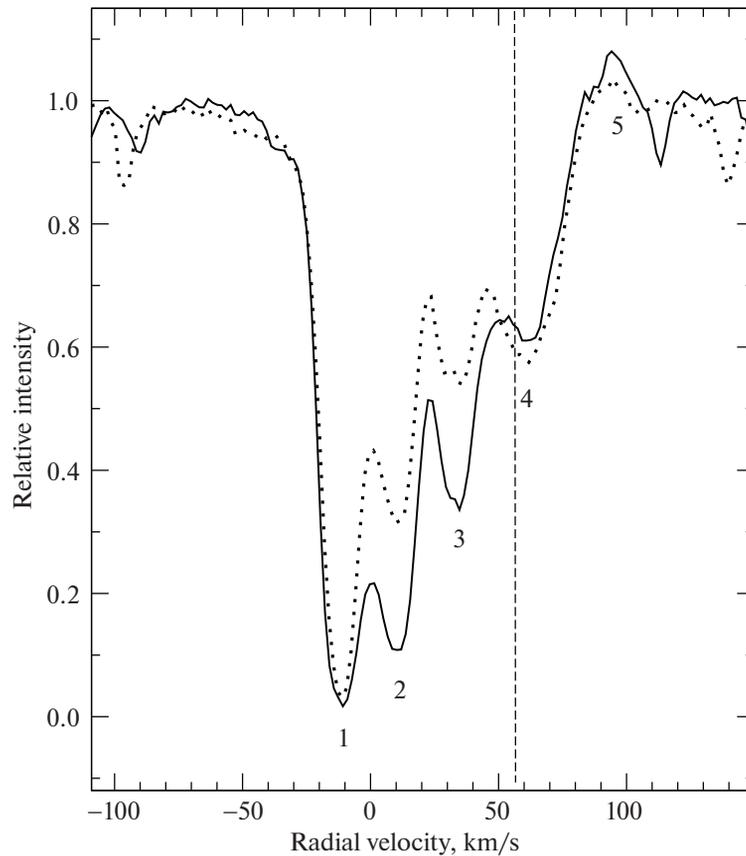


Рис. 6. Профили линий NaI 5889 и 5895 Å (точки) в спектре V340 Seg. Отмечено положение абсорбционных компонент профиля, формирующихся: “1” — в межзвездной среде, “2” и “3” — в околозвездной среде, “4” в атмосфере звезды. Вертикальной линией отмечена системная скорость $\gamma = 56.8 \pm 0.5$ км/с, согласно данным де Смедта и др. (2016).

деталей “2” и “3” насыщение в ядрах линий не достигнуто.

Подобный многокомпонентный профиль D-линий дублета NaI с фрагментом длинноволновой эмиссии был зафиксировали ранее Клочковой и Ченцовым (2004) в спектре post-AGB звезды V510 Pup (=IRAS 08005–2356). Эта звезда проэволюционировала дальше от AGB, чем V340 Seg, поэтому имеет отделившуюся оболочку, что проявляется, в частности, в наличии абсорбционных околозвездных полос системы Свана молекулы C_2 . Кроме того, для источника IRAS 08005–2356 зарегистрировано излучение OH полос одновременно на 1612 и 1667 MHz, что, согласно Льюису (1989), в отсутствие мазеров SiO и H_2O указывает на приближение объекта к стадии планетарной туманности. Отметим, что в спектре V510 Pup Клочкова и Ченцов (2004) отождествили редко наблюдаемые в спектрах post-AGB запрещенные эмиссии дублета [CaII] 7291 и 7324 Å. Эти запрещенные эмиссии низкого возбуждения характерны для спектров звезд избранных типов с истечением вещества и служат признаком наличия околозвездного диска. В частности, эти эмиссии отождествлены в спектрах желтых гипергигантов

V1302 Aql (=IRC+10420) (Клочкова и др., 1999), V509 Cas (=IRC+60379) (Арет и др., 2017; Клочкова и др., 2019; Клочкова, 2019) и в спектрах В-сверхгигантов с феноменом B[e] (Арет и др., 2012). В спектрах V340 Seg мы также видим эмиссию, которую можно было бы отождествить с запрещенной линией 7291 Å, что могло бы указать на вероятное присутствие околозвездного диска в системе. К сожалению, вторая линия этого дублета, [CaII] 7324 Å, которая могла бы подтвердить наличие запрещенной эмиссии, на нашем эшелле кадре попадает между соседними порядками. Для подтверждения присутствия этой важной спектральной особенности необходимы дополнительные наблюдения. В настоящее время мы вынуждены отождествить эмиссию 7291 Å в спектре с низковольтной линией NiI с $\lambda = 7291.449$ Å.

Эмиссионные компоненты в резонансных линиях NaI с полушириной $\Delta \approx 120$ км/с зафиксированы Клочковой и др. (2006) в спектре холодной переменной AGB-звезды, ассоциированной с ИК-источником IRAS 20508+2011. Еще более интересен многокомпонентный профиль D-линий NaI в

спектре полуправильной переменной QY Sge. Широкая эмиссия с полушириной $\Delta \approx 120$ км/с была зарегистрирована Менциесом и Вайтлоком (1988), которые предположили, что область формирования эмиссии в резонансных линиях — довольно горячая и неоднородная околозвездная оболочка, а большая ширина эмиссий вызвана рассеянием фотонов на движущихся пылинках оболочки. Рао и др. (2002), зарегистрировав в спектре QY Sge и широкие, и узкие эмиссии металлов, развили предположение Менциеса и Вайтлока (1988), предложив модель с околозвездным тором и биполярными джетами. Позже Клочкова и др. (2007b), на основе спектрального мониторинга QY Sge, подтвердили вывод о формировании эмиссии в околозвездной среде, показав стабильность ее положения во времени.

3.4. Расстояние до звезды и ее светимость

Светимость звезды оценим, используя известный для F–G сверхгигантов критерий светимости — интенсивность триплета кислорода OI 7774 Å. В спектрах V340 Ser суммарная эквивалентная ширина триплета $W_\lambda(7774) = 1.25$ Å, что является типичным значением для post-AGB звезд (см. для сравнения данные Молина и др. 2018). Оценка светимости V340 Ser по $W_\lambda(7774)$ достаточно точна, поскольку, согласно ван Винкелю (1997), в атмосфере этой звезды нет аномалии содержания кислорода. Применяя калибровку $M_V \longleftrightarrow W_\lambda(7774)$ из статьи Такеды и др. (2018), получаем для V340 Ser абсолютную величину $M_V \approx -4.6^m$. Полученная таким образом светимость V340 Ser $\log L/L_\odot = 3.75$ хорошо согласуется с ее спектральной классификацией и светимостью, ожидаемой из теоретических представлений Блекера (1995b) об эволюционном статусе post-AGB звезд.

Для оценки избытка цвета $E(B - V)$, обусловленного межзвездным поглощением, мы использовали измеренные в спектрах V340 Ser эквивалентные ширины $W_\lambda(\text{DIBs})$ для выборки DIBs и калибровочные зависимости $E(B - V) \longleftrightarrow W_\lambda(\text{DIBs})$, согласно данным Коса и Цвиттера (2013). Привлекая 7 уверенно измеренных полос из табл. 3 (4984, 5780, 5797, 6196, 6203, 6379, 6613 Å), для которых имеются калибровочные зависимости Коса и Цвиттера (2013), мы получили среднее значение избытка цвета $E(B - V) = 0.59^m$. Этот избыток заведомо ниже полного покраснения $E(B - V)$, поскольку какая-то доля покраснения звезды обусловлена поглощением еще и в околозвездной среде. Как следует из рис. 6, интенсивность

околозвездных компонент “2” и “3” лишь незначительно ниже межзвездной, что указывает на существенный вклад околозвездного поглощения в полный избыток покраснения $E(B - V)$. Де Смедт и др. (2016), моделируя SED для V340 Ser, оценили полный избыток цвета: $E(B - V) = 0.76^m$. С этой оценкой избытка цвета получаем полное поглощение $A_V \approx 2.43^m$ (при стандартном значении $R = 3.2$). Учитывая среднее значение видимого блеска $V = 9.63^m$ из статьи Архиповой и др. (2011), приходим к оценке расстояния до звезды $d \approx 2.3$ кпк. Здесь следует упомянуть оценку расстояния $d \approx 3.43$ кпк до V340 Ser из обширного каталога Викерса и др. (2015). Эти авторы, моделируя распределение энергии (SED) для post-AGB звезд, принимали для них диапазон светимостей $L/L_\odot = 6000 \pm 1500$. Наша оценка светимости V340 Ser по ИК-триpletу кислорода лежит внутри этого диапазона. Моделируя SED, Викерс и др. (2015) учли аномальный характер SED для IRAS 17279–1119, обусловленный присутствием теплой (≈ 855 К) и холодной (≈ 171 К) пыли. При этом Викерс и др. (2015) получили избыток цвета $E(B - V) = 0.45^m$, что существенно ниже избытка цвета из работы де Смедта и др. (2016) и даже ниже межзвездной доли покраснения, полученной нами по DIBs.

В каталоге Gaia DR2 (2018) для V340 Ser дано надежное значение паралакса $\pi = 0.1577 \pm 0.0427$ mas, которое приводит к значительной удаленности звезды: $d \geq 6.3$ кпк. Однако в версии 2016 г. сведения для звезды значительно отличаются: $\pi = 0.340 \pm 0.260$ mas. Эта величина паралакса дает близкое к нашей оценке расстояние до звезды, но точность паралакса слишком низка. Здесь следует сослаться на статью Ху и др. (2019), в которой они сопоставили паралаксы Gaia DR2 с данными VLBI и отметили большую разницу в этих данных для AGB-звезд с протяженными пылевыми оболочками. Кроме того, для удаленных объектов следует учитывать большой сдвиг шкалы паралаксов Gaia DR2 относительно VLBI: -0.075 ± 0.029 mas, согласно Ху и др. (2019).

В целом можно утверждать, что совокупность параметров V340 Ser: светимость, удаленность от плоскости Галактики, пониженная металличность и особенности химического состава, — согласуется с принадлежностью звезды стадии post-AGB в толстом диске Галактики. Отметим, что совокупность основных параметров и химический состав V340 Ser позволяют включить эту звезду в однородную группу post-AGB звезд с большими избытками углерода и тяжелых металлов s-процесса в атмосферах, выделенную Клочковой (1997) и ван Винкелем с Рейнерсом (2000). Все звезды этой

группы имеют структурированные, зачастую биполярные, оболочки, где формируется множество молекулярных и мазерных деталей. Кроме того, в ИК-спектрах всех этих звезд содержится пока не отождествленная эмиссия на длине волны 21 мкм (см. подробнее в статье Хривнака и др. 2009). Околозвездная среда V340 Ser не имеет этих особенностей, т.е. ее оболочка еще не отделилась от звезды и не остыла в нужной степени. Хривнак и др. (2009) указывают, что деталь на 21 мкм формируется в ИК-спектрах post-AGB звезд с холодными пылевыми оболочками, с температурой около 120–150 К.

Принадлежность V340 Ser к звездам типа RV Tau нуждается в уточнении, поскольку звезда с основными параметрами $T_{\text{eff}} = 7200$ К и светимостью $\log L/L_{\odot} = 3.75$ лежит вне полосы неустойчивости, по данным Кисса и др. (2007). Напомним, что ранее Архипова и др. (2011) также поставили под сомнение этот статус V340 Ser, а в статье Седмиака и др. (2008) V340 Ser отнесена именно к post-AGB звездам, но не к типу RV Tau.

4. ВЫВОДЫ

Изучены спектры звезды V340 Ser (=IRAS 17279–1119), полученные на 6-м телескопе БТА со спектральным разрешением $R \geq 60\,000$. Для четырех дат по многочисленным абсорбциям (от 300 до 550 линий) металлов измерена гелиоцентрическая лучевая скорость: $V_{\odot} = 59.30 \pm 0.05, 60.09 \pm 0.05, 58.46 \pm 0.06, 55.78 \pm 0.06$ км/с. Учитывая высокую точность скорости, эти значения V_{\odot} указывают на слабую переменность скорости со временем.

На профиле D-линий NaI выделены межзвездная $V_{\odot} = -11.20$, околозвездная, $V_{\odot} = +10$, компоненты, а также компонента $V_{\odot} = +34.0$ км/с, формирующаяся в самых верхних слоях атмосферы. Усредненные по четырем спектрам значения имеют точность ± 0.2 км/с. Средняя скорость по 20–30 отождествленным в спектрах полосам DIBs, $V_{\odot}(\text{DIBs}) = -11.6 \pm 0.2$ км/с, совпадает со скоростью по межзвездной компоненте NaI. Линия Na имеет профиль типа P Cyg, положение абсорбционной компоненты которого, $V_{\odot} = +34$ км/с, указывает на ее формирование в верхних слоях расширяющейся атмосферы.

Слабые эмиссии с интенсивностью около 10% от уровня местного континуума отождествлены с низковозбужденными линиями атомов металлов. Их стабильное положение, $V_{\odot} = 46.3 \pm 0.4$ км/с, систематически отличается от скорости по атмосферным абсорбциям, что указывает на наличие градиента скорости в верхних слоях атмосферы звезды.

На основании эквивалентной ширины ИК-триплета кислорода $W(\text{OI } 7774) = 1.25 \text{ \AA}$ получена оценка абсолютной величины $M_v \approx -4.6^m$, которая с учетом полного (в межзвездной и околозвездной среде) поглощения приводит к оценке расстояния до звезды $d \approx 2.3$ кпк. Это значение в два раза ниже расстояния, соответствующего параллаксу V340 Ser из DR2 Gaia (2018). Такое различие может быть следствием особенностей учета поглощения в межзвездной среде и околозвездной оболочке объекта. Принадлежность V340 Ser к звездам типа RV Tau нуждается в уточнении, поскольку звезда с основными параметрами $T_{\text{eff}} = 7200$ К и светимостью $\log L/L_{\odot} = 3.75$ лежит вне полосы неустойчивости.

Авторы благодарят за частичную финансовую поддержку Российский фонд фундаментальных исследований (проект 18-02-00029а). В работе использованы базы астрономических данных SIMBAD, SAO/NASA ADS, ASAS и Gaia DR2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арет и др. (A. Aret, M. Kraus, M.F. Muratore, and M. Borges Fernandes), MNRAS **423**, 284 (2012).
2. Арет и др. (A. Aret, M. Kraus, I. Kolka, and G. Maravelias), ASP Conf. Ser. **508**, 357 (2017).
3. Архипова В.П., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Письма в Астрон. журн. **37**, 691 (2011) [V.P. Arkhipova, et al., Astron. Lett. **37**, 635 (2011)].
4. Бэйрд (S.R. Baird), Publ. Astron. Soc. Pacific **94**, 850 (1982).
5. Бэйрд (S.R. Baird), Publ. Astron. Soc. Pacific **96**, 72 (1984).
6. Блекер (T. Blöcker), Astron. Astrophys. **297**, 727 (1995a).
7. Блекер (T. Blöcker), Astron. Astrophys. **299**, 755 (1995b).
8. Бопп (B.W. Bopp), Publ. Astron. Soc. Pacific **96**, 432 (1984).
9. Бэккер и др. (E. Bakker, H.J.G.L.M. Lamers, L.B.F.M. Waters, and T. Schoenmaker), Astrophys. Space Science, **224**, 335 (1995).
10. Бэккер и др. (E. Bakker, E.F. van Dishoeck, L.B.F.M. Waters, and T. Schoenmaker), Astron. Astrophys. **323**, 469 (1997).
11. ван Винкель (H. van Winckel), Astron. Astrophys. **319**, 561 (1997).
12. ван Винкель, Рейнерс (H. van Winckel and M. Reyniers), Astron. Astrophys. **354**, 135 (2000).
13. Вотерс и др. (L.B.F.M. Waters, C. Waelkens, M. Mayor, and N.R. Trams), Astron. Astrophys. **269**, 242 (1993).
14. Викерс и др. (S.B. Vickers, D.J. Frew, O.A. Parker, and I.S. Bojicic), MNRAS **447**, 1673 (2015).
15. Галазутдинов (G.A. Galazutdinov), Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв. No. 92, (1992).
16. Гиридар и др. (S. Giridhar, D.L. Lambert, and G. Gonzalez), Astrophys. J. **531**, 521 (2000).

17. Гонзалес и др. (G. Gonzalez, D.L. Lambert, and S. Giridhar), *Astrophys. J.* **479**, 427 (1997).
18. Дженнискенс, Десерт (P. Jenniskens and F.-X. Désert), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **106**, 39 (1994).
19. Казаровец и др. (E.V. Kazarovets, N.N. Samus, and O.V. Durlevich), *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 4870 (2000).
20. Каталог Gaia DR2 (F. Arenou, X. Luri, C. Babusiaux, et al.) *Astron. Astrophys.* **616**, id. A17 (2018). (CDS/ADC Collection of Electronic Catalogues, 1345, 0, 2018)
21. Киппер, Клочкова (Tõnu Kipper and V.G. Klochkova), *Baltic Astron.* **22**, 77 (2013).
22. Кисс и др. (L.L. Kiss, A. Derekas, Gy.M. Szabó, T.R. Bedding, and L. Szabados), *MNRAS* **375**, 1338 (2007).
23. Клочкова (V.G. Klochkova), *MNRAS* **272**, 710 (1995).
24. Клочкова (V.G. Klochkova), *Bull. Spec. Astrophys. Observ.* **44**, 5 (1997).
25. Клочкова (V.G. Klochkova), *Astrophys. Bull.* **69**, 279 (2014).
26. Клочкова (V.G. Klochkova), *Astrophys. Bull.* **74**, 475 (2019).
27. Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Письма в Астрон. журн. **24**, 754 (1998) [V.G. Klochkova and V.E. Panchuk, *Astron. Lett.* **24**, 650 (1998)].
28. Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Астрон. журн. **89**, 128 (2012) [V.G. Klochkova and V.E. Panchuk, *Astron. Rep.* **56**, 104 (2012)].
29. Клочкова, Таволжанская (V.G. Klochkova and N.S. Tavołzhanskaya), *Astrophys. Bull.* **74**, 277 (2019).
30. Клочкова В.Г., Ченцов Е.Л., Астрон. журн. **81**, 333 (2004). [V.G. Klochkova and E.L. Chentsov, *Astron. Rep.* **48**, 301 (2004)]
31. Клочкова и др. (V.G. Klochkova, E.L. Chentsov, and N.S. Tavołganskaya), *Astrophys. Bull.* **48**, 25 (1999).
32. Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Жао Г., Астрон. журн. **83**, 265 (2006) [V.G. Klochkova, et al., *Astron. Rep.* **50**, 232 (2006)]
33. Клочкова и др. (V.G. Klochkova, E.L. Chentsov, N.S. Tavołganskaya, and M.V. Shapovalov), *Astrophys. Bull.* **62**, 162 (2007a).
34. Клочкова и др. (V.G. Klochkova, V.E. Panchuk, E.L. Chentsov, and M.V. Yushkin), *Astrophys. Bull.* **62**, 162 (2007b).
35. Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Астрон. журн. **95**, 659 (2018). [V.G. Klochkova, et al., *Astron. Rep.* **62**, 623 (2018)]
36. Клочкова и др. (V.G. Klochkova, E.L. Chentsov, and V.E. Panchuk), *Astrophys. Bull.* **74**, 41 (2019).
37. Кос, Цвиттер (J. Kos and T. Zwitter), *Astrophys. J.* **774**, 72 (2013).
38. Крисченцо и др. (M. Di Criscienzo, P. Ventura, D.A. Garcia-Hernández, F. Dell'Agli, M. Castellani, P.M. Marrese, S. Marinoni, G. Giuffrida, and O. Zamora), *MNRAS* **462**, 395 (2016).
39. Лью и др. (N. Liu, R. Gallino, S. Bisterzo, A.M. Davis, R. Trappitsch, and L.R. Nittler), *Astrophys. J.* **865**, 112 (2018).
40. Льюис (B.M. Lewis), *Astrophys. J.* **338**, 234 (1989).
41. Менциес, Вайтлок (J.W. Menzies and P.A. Whitelock), *MNRAS* **233**, 697 (1988).
42. Молина и др. (R.E. Molina, S. Giridhar, C.B. Pereira, A. Arellano Ferro, and S. Muneer), *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* **50**, 293 (2014).
43. Оомен и др. (G.-M. Oomen, H. van Winckel, O. Pols, G. Nelemans, A. Escorza, R. Manick, D. Kamath, and C. Waelkens), *Astron. Astrophys.* **620**, A85 (2018).
44. Оудмайер и др. (R.D. Oudmaijer, W.E.C.J. van der Veen, L.B.F.M. Waters, N.R. Trams, C. Waelkens, and E. Engelsman), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **96**, 625 (1992).
45. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Астрон. журн. **94**, 808 (2017).
46. Поллард и др. (K.R. Pollard, P.L. Cottrell, W.A. Lawson, M.D. Albow, and W. Tobin), *MNRAS* **286**, 1 (1997).
47. Рао и др. (N. Rao Kameswara, A. Goswami, and D.L. Lambert), *MNRAS* **334**, 129 (2002).
48. Рао и др. (S. Sumangala Rao, S. Giridhar, and D.L. Lambert), *MNRAS* **419**, 1254 (2012).
49. Санчез Котрерас и др. (C. Sánchez Contreras, R. Sahai, R. Goodrich, and A. Gil de Paz), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **179**, 166 (2008).
50. Сёдмиак и др. (N. Siódmiak, M. Meixner, T. Ueta, В.Е.К. Sugerma, G.C. van de Steene, and R. Szczerba), *Astrophys. J.* **677**, 382 (2008).
51. де Смедт и др. (K. De Smedt, H. van Winckel, D. Kamath, L. Siess, S. Goriely, A.I. Karakas, R. Manick), *Astron. Astrophys.* **587**, A6 (2016).
52. Такеда и др. (Y. Takeda, G. Jeong, and I. Han), *Publ. Astron. Soc. Japan* **70**, id.8 (2018).
53. Ферро и др. (A. Arellano Ferro, S. Giridhar, and P. Mathias), *Astron. Astrophys.* **368**, 250 (2001).
54. Хервиг (F. Herwig), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **43**, 435 (2005).
55. Хривнак и др. (B.J. Hrivnak, K. Volk, and S. Kwok), *Astrophys. J.* **694**, 1147 (2009).
56. Ху и др. (S. Xu, B. Zhang, M.J. Reid, Z. Xingwu, W. Guangli), *Astrophys. J.* **875**, 114 (2019).
57. Юшкин М.В., Клочкова В.Г., Препринт CAO No. 206 (2005).