

УДК 524.31-355

ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТР УДАЛЕННОЙ OH/IR-ЗВЕЗДЫ V1648 AQL (IRAS 19386+0155)

© 2019 В. Г. Клочкова^{1*}, Н. С. Таволжанская¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 20 марта 2019 года; после доработки 14 мая 2019 года; принята к публикации 14 мая 2019 года

На 6-м телескопе БТА со спектральным разрешением $R \geq 60\,000$ получен оптический спектр звезды V1648 Aql (IRAS 19386+0155). По многочисленным абсорбциям металлов измерена гелиоцентрическая лучевая скорость: $V_r = 10.18 \pm 0.05 \text{ км с}^{-1}$ ($V_{LSR} = 18.1 \text{ км с}^{-1}$). На профиле D-линий NaI выделены атмосферный, околозвездный и межзвездный компоненты: $V_r = 9.2, -3.4$ и -12.8 км с^{-1} соответственно. Усредненная по набору из 20 отождествленных в спектре DIBs скорость, $V_r = -12.5 \pm 0.2 \text{ км с}^{-1}$, совпадает со скоростью по межзвездному компоненту NaI. В спектре зафиксированы слабые эмиссии с интенсивностью около 10% от уровня местного континуума, отождествленные с низковозбужденными линиями атомов металлов. Их среднее положение, $V_r = 8.44 \pm 0.28 \text{ км с}^{-1}$, указывает на наличие слабого градиента скорости в верхних слоях атмосферы звезды. На основании спектральных данных сделаны оценка светимости звезды $M_V \approx -5^m$ и нижняя оценка расстояния $d \geq 1.8 \text{ кпк}$ с учетом межзвездного и околозвездного покраснения. Методом моделей атмосфер определены значения фундаментальных параметров и содержания 19 химических элементов в атмосфере, подтверждающие для V1648 Aql статус post-AGB-звезды.

Ключевые слова: *звезды: эволюция — звезды: индивидуальные: V1648 Aql — звезды: AGB и post-AGB*

1. ВВЕДЕНИЕ

На основании проведенных фотометрических наблюдений в видимом и ИК-диапазонах авторы [1] пришли к выводу о принадлежности точечного инфракрасного источника IRAS 19386+0155 к объектам вблизи асимптотической ветви гигантов (AGB). При наличии значительного ИК-потока излучение мазера OH в полосе 1612 МГц отсутствует [2], что указывает на более позднюю стадию post-AGB. Повторный анализ данных обзора с радиотелескопом обсерватории Аресибо позволил обнаружить слабое излучение источника IRAS 19386+0155 в полосах OH мазера [3]. На основе поляриметрии в ближнем ИК-диапазоне Гледхил [4] заподозрил возможную принадлежность IRAS 19386+0155 к биполярным туманностям.

На стадии post-AGB наблюдаются далеко проэволюционировавшие звезды с исходными массами в интервале 2–8 M_{\odot} . На предшествующей эволюционной стадии AGB эти звезды наблюдаются в виде красных сверхгигантов (их эффективная температура $T_{\text{eff}} \approx 3000\text{--}4500 \text{ К}$). AGB-стадия

для звезд вышеуказанных масс является заключительной фазой эволюции с ядерным горением в их недрах [5]. Интерес к AGB-звездам и к их ближайшим потомкам объясняется прежде всего тем, что именно в недрах этих звезд, находящихся на кратковременной эволюционной стадии, создаются физические условия для синтеза ядер и выноса наработанных продуктов ядерных реакций в звездную атмосферу и далее в околозвездную и межзвездную среду. В результате AGB-звезды с исходными массами ниже 3–4 M_{\odot} являются основными поставщиками (свыше 50% всех элементов тяжелее железа) тяжелых металлов, синтезированных за счет s-процесса, суть которого состоит в медленной (по сравнению с β -распадом) нейтронизации ядер. Затравочными ядрами для цепочки реакций s-процесса служат ядра Fe. У звезд с исходной массой ниже 3–4 M_{\odot} необходимой поток нейтронов обеспечивает реакция $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, а в случае более массивных звезд с начальными массами более 4–5 M_{\odot} аналогичная реакция идет на ядрах ^{22}Ne . 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 [6–8].

*E-mail: valenta@sao.ru

Источник IRAS 19386+0155 в оптическом диапазоне отождествлен со сверхгигантом V1648 Aql спектрального класса F5 I [9]. Этот сверхгигант лежит вне плоскости Галактики, что уже указывает на его вероятную принадлежность к проэволюционировавшим звездам с исходной массой $2-8 M_{\odot}$. К настоящему времени звезда была изучена преимущественно фотометрическими методами. В частности, Архипова и др. [10], выполнив 19-летний *UBV*-мониторинг звезды, изучили кривую блеска и пришли к выводу о синусоидальной переменности блеска с типичной для *post-AGB*-звезд амплитудой и периодом около 100 дней. Отметим выявленный этими авторами сложный характер долговременной переменности показателей цвета V1648 Aql, для интерпретации которой необходим дальнейший мониторинг звезды. Позже Хривнак и др. [11], присоединив к своим наблюдениям многочисленные фотометрические данные других авторов, включая [10], подтвердили значения периодов переменности блеска и тренды в переменности величин блеска и показателей цвета. Близкой по совокупности наблюдаемых свойств к V1648 Aql является V887 Her — центральная звезда ИК-источника IRAS 18095+2704. На основании двугорбого распределения энергии и наличия излучения OH-мазера Хривнак и др. [12] рассматривают IRAS 18095+2704 как прототип O-rich протопланетарных туманностей. Льюис [3], анализируя свойства обширной выборки высокоширотных OH/IR-звезд, также подчеркнул близость эволюционного состояния протопланетарных туманностей IRAS 18095+2704 и IRAS 19386+0155.

Будучи довольно слабой в оптическом диапазоне, звезда V1648 Aql крайне редко изучалась методом оптической спектроскопии. Известна публикация Перейры и др. [13], авторы которой методом моделей атмосфер на основе спектра высокого разрешения в широком интервале длин волн определили фундаментальные параметры и химический состав центральной звезды этого источника. Авторы пришли к выводу о том, что V1648 Aql — это O-rich-звезда с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 6800 \pm 100$ K, ускорением силы тяжести $\lg g = 1.4 \pm 0.2$ и с пониженной металличностью $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -1.1$. Ими также получены содержания ряда легких металлов и тяжелых элементов в атмосфере. Важным результатом исследования [13] является моделирование нетипичного для *post-AGB*-звезд распределения энергии в спектре звезды, что привело авторов к выводу о возможном присутствии пылевого диска. К сожалению, авторы [13] мало внимания уделили особенностям оптического спектра, а сведения о картине лучевых скоростей в системе в их статье отсутствуют вовсе. Таким образом, очевид-

на необходимость продолжения изучения системы ИК-источника IRAS 19386+0155.

В данной статье мы представляем результаты анализа оптического спектра V1648 Aql, полученного в 2017 г. В разделе 2 кратко описаны методы наблюдений и анализа данных. В разделе 3 мы приводим результаты, сопоставляя их с опубликованными ранее, и в разделе 4 приведены выводы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Спектр V1648 Aql получен 7 августа 2017 г. с эшелльным спектрографом НЭС [14], стационарно расположенным в фокусе Нэсмита 6-м телескопа БТА САО РАН. В эту дату эшелльный спектрограф НЭС был оснащен ПЗС-матрицей форматом 4068×2048 элементов с размером пикселя 0.0135×0.0135 мм, шум считывания $1.8 e^{-}$. Зарегистрированный спектральный диапазон составляет $\Delta\lambda = [470; 778]$ нм. Для уменьшения световых потерь без снижения спектрального разрешения спектрограф НЭС снабжен резателем изображения на три среза. Каждый спектральный порядок на двумерном изображении спектра повторяется трижды со смещением вдоль дисперсии эшелл-решетки [14]. Спектральное разрешение составляет $\lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$, отношение сигнала к уровню шумов $S/N > 100$ и вдоль эшелльного порядка меняется от 100 до 150.

Экстракция одномерных данных из двумерных эшелл-спектров выполнена с помощью модифицированного (с учетом особенностей эшелл-кадров используемого спектрографа) контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS (см. детали в работе [15]). 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 последней версии программы DECH20t [16]. Отметим, что эта традиционно используемая нами программа обработки спектров позволяет измерять лучевые скорости для отдельных деталей профилей линий. Систематические ошибки измерения гелиоцентрических скоростей V_r , оцененные по резким межзвездным компонентам Na I, не превышают 0.25 км с^{-1} (по одной линии), случайные ошибки для неглубоких абсорбций порядка 0.5 км с^{-1} — среднее значение на одну линию. Тем самым для наших усредненных величин в таблице 1 случайные ошибки — порядка 0.2 км с^{-1} . Отождествление деталей в спектре V1648 Aql мы проводили, используя

Таблица 1. Результаты измерений гелиоцентрической лучевой скорости V_r в спектре V1648 Aql 7 августа 2017 г. Число измеренных линий каждого типа указано в скобках

Линии или элемент	$V_r, \text{ км с}^{-1}$		
	Звездная атмосфера	CS	IS
Абсорбции	10.18 ± 0.05 (349)		
Эмиссии	8.44 ± 0.28 (18)		
H α (ядро)	9.2		
H β (ядро)	10.6		
Na I	9.2 (2)	-3.4 (2)	-12.8 (2)
K I		-3.7 (1)	
DIBs			-12.5 ± 0.2 (20)

опубликованный ранее атлас [17] оптического спектра канонической post-AGB-звезды HD 56126 (IRAS 07134+1005, $S_p=F5 \text{ Iab}$), базирующийся на наблюдательных данных 6-м телескопа в сочетании со спектрографом НЭС.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Особенности оптического спектра V1648 Aql и картины лучевых скоростей

Оптический спектр V1648 Aql в целом соответствует ожидаемому спектру F5I сверхгиганта, обладая при этом рядом особенностей. Во-первых, профиль H α , представленный на рис. 1 в координатах «относительная интенсивность—лучевая скорость», является комплексным и включает широкие крылья и узкое ядро, что указывает на структурированную атмосферу сверхгиганта с оболочкой. При этом профиль H β чисто абсорбционный, видимых эмиссионных деталей не содержит. Как следует из таблицы 1, положение ядра H β совпадает с положением атмосферных абсорбций металлов. Профиль H α в спектре V1648 Aql, полученный авторами [13] в 2000 г., не отличается от полученного нами спустя почти 17 лет. Этот тип профиля типичен для post-AGB-звезд, примером может послужить рис. 6 с профилями в спектрах четырех южных post-AGB-звезд [18].

В спектре уже упомянутой родственной post-AGB-звезды V887 Her профиль H α , представленный на рис. 2 в статье [19], также состоит из подобных компонентов. Причем узкое ядро на этом профиле имеет оболочечные эмиссии, которые в спектре V1648 Aql менее выражены. Этот же тип профиля H α можно видеть и в некоторые моменты наблюдений HD 56126. На рис. 1 в атласе [17] приведено полезное сравнение профилей H α в спектре HD 56126 и в спектре классического массивного сверхгиганта α Per.

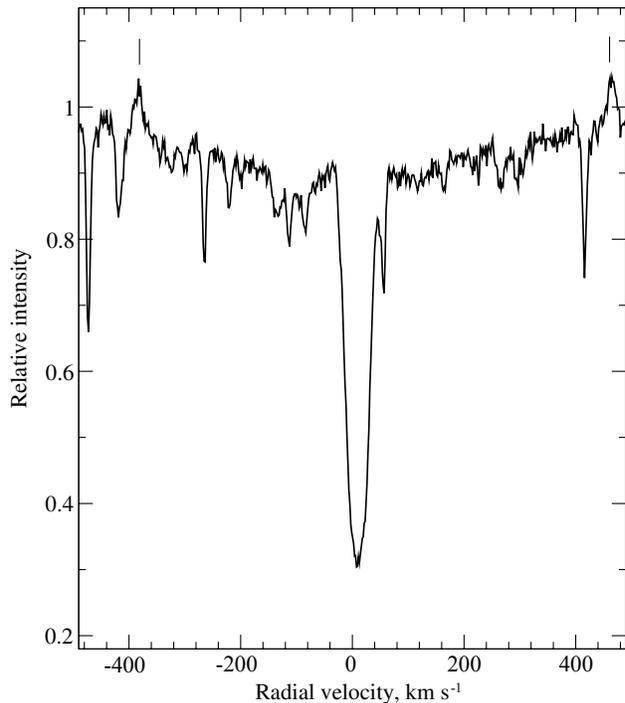


Рис. 1. Профиль H α в спектре V1648 Aql. Вертикальными линиями указаны положения эмиссий Ti I 6554.23 Å и Ca I 6572.80 Å.

Полученная нами по многочисленным абсорбциям металлов в спектре V1648 Aql средняя скорость $V_r = 10.18 \text{ км с}^{-1}$ ($V_{LSR} = 18.1 \text{ км с}^{-1}$) согласуется с профилем скорости по полосам мазеров OH для ассоциированного источника IRAS 19386+0155 [3], что позволяет нам принять значение $V_{LSR} = 18.1 \text{ км с}^{-1}$ в качестве системной скорости V1648 Aql. Отметим, что OH-профили для источника IRAS 19386+0155 имеют большую ширину $\Delta V_r \approx 50 \text{ км с}^{-1}$ [3], что не позволяет нам точнее фиксировать значение только LSR по радиоданным. Ниже рассмотрим картину луче-

вых скоростей по особым группам спектральных деталей, впервые отождествленных в спектре V1648 Aql.

3.1.1. Эмиссии металлов

Спектральный фрагмент на рис. 2 иллюстрирует следующую особенность оптического спектра V1648 Aql: наличие слабых эмиссий нейтральных металлов с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня. Две аналогичные эмиссии на крыльях $H\alpha$ хорошо видны на рис. 1. В таблице 2 перечислены все такого рода эмиссии, отождествленные нами в зарегистрированном диапазоне длин волн. В последнем столбце этой таблицы приведены значения скорости, соответствующие положению эмиссии. Средняя скорость по 18 эмиссионным деталям, $V_r(\text{emis}) = 8.44 \pm 0.28 \text{ км с}^{-1}$, мало отличается от средней скорости по абсорбциям, $V_r = 10.18 \pm 0.05 \text{ км с}^{-1}$. Однако с учетом хорошей точности средних можно говорить о наличии слабого градиента скорости в атмосфере звезды. Полуширины этих эмиссий составляют около 0.3 \AA , или $\Delta V_r \approx 13 \text{ км с}^{-1}$, превышая в 2–2.2 раза полуширины запрещенных ионосферных эмиссий [O I] в спектре, что подтверждает формирование эмиссий скорее в атмосфере V1648 Aql. Отметим, что на рис. 1 в статье [13] также видны эмиссии на крыльях $H\alpha$, однако авторы не придали значения этой особенности.

Подобные низковозбужденные эмиссии нейтральных металлов были ранее зафиксированы в спектре post-AGB-кандидата LN Hyа (IRAS 12538 – 2611) [20], имеющего спектральный класс F3Ia, близкий к таковому у V1648 Aql. Часть эмиссионных деталей указанного выше типа из таблицы 2 содержится и в спектре LN Hyа. В случае LN Hyа эмиссии металлов появились в спектрах, полученных в моменты наблюдений в ее активные фазы 2010 г., когда профиль типа обратного P Cug существенно отличался от того, что наблюдался в спокойные фазы. При этом положение абсорбционного компонента $H\alpha$ также значительно отличалось от положения в другие моменты наблюдений. Кроме того, ядро $H\alpha$ было существенно (примерно на 15 км с^{-1}) сдвинуто в длинноволновую область относительно симметричных абсорбций металлов.

Некоторые эмиссии Fe, Co, Ni из таблицы 2 присутствуют также в спектре желтого гипергиганта ρ Cas с протяженной оболочкой (см. детали и необходимые ссылки в статье [21]). 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 скорости с системной

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 звезды, что может указывать на относительную стабильность меры эмиссии, наблюдаемой на фоне ослабленного спектра фотосферы.

3.1.2. Полосы DIBs и многокомпонентный профиль D-линий Na I

В оптическом спектре V1648 Aql, несмотря на значительную ее удаленность от плоскости Галактики (галактическая широта звезды $|b| > 10^\circ$), содержатся многочисленные межзвездные детали. В таблице 3 перечислены межзвездные полосы (DIBs) из известного списка [22], отождествленные нами и надежно выделенные среди бленд в спектре V1648 Aql. Для этих деталей в таблице приведены лучевые скорости, соответствующие положениям полос, и их эквивалентные ширины W_λ . Измеренные эквивалентные ширины для нескольких общих DIBs хорошо согласуются с данными, измеренными в спектре V1648 Aql авторами [23]. Однако в лучевых скоростях согласия нет.

Высокое качество спектра позволило нам впервые разрешить на компоненты D-линии Na I 5889 и 5895 \AA , а также впервые измерить положение межзвездной абсорбции K I 7696 \AA . На профиле линий Na I 5889 и 5895 \AA в спектре V1648 Aql уверенно выделяются индивидуальные компоненты, усредненное положение которых указано в таблице 1 и на рис. 3. Положение длинноволнового компонента, $V_r = 9.2 \text{ км с}^{-1}$, согласуется в пределах указанных выше ошибок со средней скоростью V_r , измеренной по большому набору абсорбций металлов, что свидетельствует о формировании этого компонента в атмосфере звезды. Положение самого коротковолнового компонента линий дублета Na I, $V_r = -12.8 \text{ км с}^{-1}$, совпадает с усредненным значением скорости по набору DIBs, отождествленных в спектре, что позволяет утверждать, что этот компонент формируется в межзвездной среде. На рис. 3 можно видеть различающуюся крутизну крыльев атмосферного и межзвездного компонентов, что также подтверждает нашу трактовку областей их формирования.

Компонент D-линий Na I со скоростью $V_r = -3.4 \text{ км с}^{-1}$ смещен в коротковолновую область на 13.6 км с^{-1} относительно средней лучевой скорости по атмосферным абсорбциям. Естественно предположить, что этот компонент формируется в околосредней оболочке, расширяющейся со скоростью $V_{\text{exp}} = 13.6 \text{ км с}^{-1}$, типичной для post-AGB-звезд (см. для сравнения многочисленные примеры в работах [24, 25]).

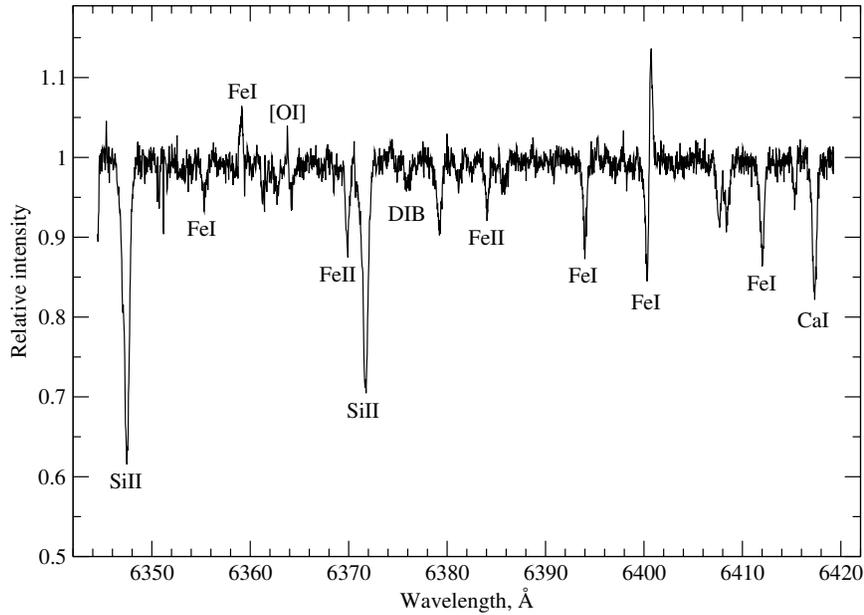


Рис. 2. Фрагмент спектра V1648 Aql, содержащий сильные абсорбции Si II(2)6347 и 6371 Å, эмиссии Fe I 6359 и 6400 Å, межзвездную деталь (DIB) $\lambda = 6376$ Å, а также эмиссию [O I] 6363 Å ионосферного происхождения. Указано отождествление основных деталей фрагмента.

Таблица 2. Список эмиссий металлов в спектре V1648 Aql

λ , Å	Элемент	V_r , км с ⁻¹	λ , Å	Элемент	V_r , км с ⁻¹	λ , Å	Элемент	V_r , км с ⁻¹
5644.14	Ti I	11.20	6280.62	Fe I	6.57	6624.84	V I	10.54
5847.00	Co I	8.00	6358.69	Fe I	9.75	6743.12	Ti I	9.17
5956.70	Fe I	8.78	6498.95	Fe I	8.08	7052.87	Co I	8.93
6007.31	Ni I	9.83	6554.23	Ti I	8.20	7138.91	Ti I	7.21
6108.11	Ni I	10.96	6572.80	Ca I	8.41	7357.74	Ti I	9.05
6191.19	Ni I	6.34	6574.24	Fe I	7.13	7714.31	Ni I	9.67

Таблица 3. Параметры межзвездных полос DIBs в спектре V1648 Aql

λ , Å	V_r , км с ⁻¹	W_λ , мÅ	λ , Å	V_r , км с ⁻¹	W_λ , мÅ	λ , Å	V_r , км с ⁻¹	W_λ , мÅ
5456.00	-13.73	15	6158.57	-11.29	41	6445.28	-11.92	6
5487.67	-12.99	18	6195.98	-14.14	40	6449.22	-14.83	7
5512.68	-14.02	16	6203.05	-12.60	88	6613.62	-12.37	144
5780.48	-12.43	200	6234.03	-11.16	22	6660.71	-12.23	28
5849.81	-11.65	7	6269.85	-13.62	33	7367.13	-12.76	28
5910.57	-14.10	12	6376.08	-13.63	19	7651.40	-13.22	15
6089.85	-10.09	13	6379.32	-13.64	55			

3.1.3. Светимость и расстояние до звезды

Каталог Gaia DR2 дает ненадежное (отрицательное) значение параллакса для V1648 Aql (как и для некоторых других удаленных звезд с пылевыми оболочками), что уже указывает на большую

удаленность объекта. Попробуем оценить светимость звезды и расстояние до нее на основании полученных нами спектральных данных. Для оценки избытков цвета $E(B - V)$, обусловленных межзвездным поглощением, используем измерен-

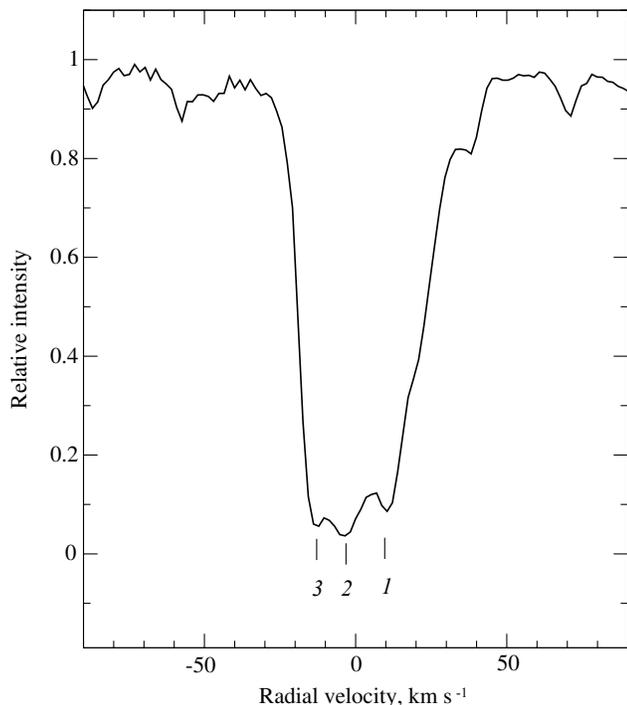


Рис. 3. Профиль линии Na I 5895 Å в координатах «относительная интенсивность—лучевая скорость». Отмечено положение компонентов профиля: 1 формируется в атмосфере звезды; 2 — в околозвездной оболочке, 3 — в межзвездной среде.

ные интенсивности для выборки DIBs и калибровочные зависимости $E(B - V) \leftrightarrow W_\lambda(\text{DIBs})$, согласно данным [26]. Привлекая для надежности лишь восемь наиболее уверенно измеренных полос с $W_\lambda > 10 \text{ m}\text{\AA}$ из таблицы 3, получаем среднее значение избытка цвета $E(B - V) = 0^{\text{m}}68$. Эта величина избытка цвета обусловлена только межзвездным поглощением. Какая-то доля полного покраснения звезды обусловлена поглощением не в межзвездной, а в околозвездной среде. Поэтому естественно, что наша оценка избытка цвета несколько ниже величины $E(B - V) = 0^{\text{m}}8 - 0^{\text{m}}9$ в статье [10].

Светимость звезды оценим, используя известный для проэволюционировавших звезд критерий светимости — интенсивность триплета кислорода O I 7774 Å. Суммарная эквивалентная ширина триплета в нашем спектре равна $W_\lambda(7774) = 1.42 \text{ \AA}$, что является типичным значением для post-AGB-звезд (см. для сравнения данные в [27]). При этом эквивалентная ширина триплета в спектре V1648 Aql в 1.5–2 раза ниже эквивалентной ширины триплета в спектрах массивных звезд высокой светимости близкого спектрального класса: V1302 Aql [28], V509 Cas [29]. С учетом калибровки $M_V \leftrightarrow W_\lambda(7774)$, согласно [30], полу-

чаем для V1648 Aql светимость, соответствующую интенсивности триплета в спектре: $M_V \approx -5^{\text{m}}$. Результаты Такеды и др. [30] позволяют нам отметить хорошее согласие двух спектральных параметров, полученных по спектру V1648 Aql, а именно: ускорения силы тяжести и $W_\lambda(7774)$.

Полученная нами светимость хорошо согласуется со спектральной классификацией и светимостью, ожидаемой из теоретических представлений об эволюции post-AGB звезд [31]. Однако оценка светимости по $W_\lambda(7774)$ не вполне точна по ряду причин. Во-первых, у V1648 Aql наблюдается многолетний тренд видимого блеска примерно на $0^{\text{m}}4$ [10]. Во-вторых, эквивалентная ширина триплета O I 7774 Å может быть повышена из-за большого избытка кислорода в атмосфере V1648 Aql. Ковтюх и др. [32] рассмотрели влияние на калибровочную зависимость $M_V \leftrightarrow W_\lambda(7774)$ параметров звезд, включая их металличность. При этом они справедливо отметили малое влияние содержания кислорода на W_λ насыщенных линий триплета O I 7774 Å.

Учитывая тренд видимого блеска из [10] и величину поглощения $A_V = 2^{\text{m}}17$ (при стандартном значении $R = 3.2$), получаем расстояние до звезды $d \approx 5$ кпк. Если же учесть еще и избыток цвета из-за поглощения в оболочке звезды, который по оценкам Архиповой и др. [10] составляет около $0^{\text{m}}4$, то расстояние до звезды уменьшится до 3.8 кпк (при $R = 3.2$) и даже до 1.8 кпк (при $R = 7.4$). Здесь стоит упомянуть оценку расстояния IRAS 19386+0155 в каталоге [33]. Моделируя SED, эти авторы пришли к оценке светимости $L/L_\odot = 6000$, что близко к нашему определению светимости по триpletу кислорода. При этом ими получены низкий избыток цвета $E(B - V) = 0^{\text{m}}36$ и расстояние $d = 3.3$ кпк. Эти оценки малонадежны, если учесть аномальный характер SED для IRAS 19386+0155, обусловленный присутствием теплой (порядка 1000 K) и холодной (около 200 K) пыли [13].

В целом приходится признать, что расстояние до V1648 Aql пока определено не вполне точно, но мы можем считать нижней его оценкой $d \approx 1.8$ кпк.

3.2. Химический состав атмосферы V1648 Aql

В определении химического состава звездной атмосферы сложным моментом всегда является фиксация основных параметров — эффективной температуры T_{eff} и ускорения силы тяжести $\lg g$. Задача усложняется для объекта с околозвездной пылевой оболочкой, для которого из-за неопределенности покраснения затруднительно применять

фотометрические данные для определения эффективной температуры. В качестве исходных параметров модели T_{eff} , $\lg g$ и микротурбулентной скорости ξ_t мы использовали значения, определенные для V1648 Aql с хорошей точностью в рамках чисто спектрального подхода [13]. Эти авторы получили надежные содержания химических элементов на основе высококачественного спектра с применением современного метода анализа. Поэтому ниже рассмотрим полученный нами химический состав лишь вкратце, останавливаясь на некоторых ключевых моментах.

Добиваясь соблюдения ионизационного баланса для Fe I и Fe II, мы выполнили многочисленные расчеты их содержаний, варьируя основные параметры модели атмосферы. В качестве окончательных нами приняты значения: $T_{\text{eff}} = 6800 \pm 100$ K, $\lg g = 1.2 \pm 0.2$, $\xi_t = 8.3 \pm 0.5$ км с⁻¹, которые в пределах ошибок согласуются с параметрами из [13]. Выбор эффективной температуры и ускорения силы тяжести подтверждается хорошим согласием содержаний по абсорбциям нейтральных атомов и ионов для Ti и Cr. При этом согласие хуже для кремния, что мало значимо из-за небольшого числа линий Si II. При определении параметров модели атмосферы и в расчетах содержаний мы использовали линии малой и умеренной интенсивности с эквивалентными ширинами $W_\lambda \leq 0.25$ Å, поскольку приближение стационарной плоскопараллельной атмосферы может быть неадекватным при описании более сильных спектральных деталей. Все эквивалентные ширины абсорбций измерены в приближении гауссианы. Значения сил осцилляторов $\lg gf$ и иных атомных констант заимствованы из базы данных VALD [34, 35]. Расчеты плоскопараллельных моделей и химического состава в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) выполнены нами с помощью последней версии программ, разработанных В.В. Цымбалом [36] и адаптированных им же для ПК в среде OS Linux.

В таблице 4 даны полученные средние содержания элементов $\lg \varepsilon(E)$, а также относительные содержания $[X/Fe]_\odot$. Химический состав фотосферы Солнца во второй колонке, относительно которого рассмотрим содержания химических элементов исследуемой звезды, взят из работы [37]. Разброс содержаний химических элементов, полученных по набору линий, невелик: ошибка среднего σ в основном не превышает 0.3 dex для элементов с числом использованных абсорбций более четырех (см. таблицу 4).

3.2.1. Элементы железного пика

Содержание железа, принимаемое обычно в качестве металличности звезды, в атмосфере V1648 Aql

отличается от солнечного: $\lg \varepsilon(\text{Fe I}) = 6.82$. Надежно определенные содержания титана, хрома и никеля, которые относятся к группе железа, также мало отличаются от нормального: $[\text{Ti}, \text{Cr I}, \text{Ni}/\text{Fe}]_\odot = +0.12$.

3.2.2. Легкие элементы

При анализе особенностей химического состава атмосферы V1648 Aql следует учитывать результаты моделирования ее распределения энергии (SED) [13], на основании которых оболочка этой звезды отнесена к типу O-rich. Согласно современным представлениям [7, 39], в атмосфере O-rich-звезды на стадии post-AGB можно было бы ожидать присутствие свеженаработанного лития, синтез которого происходит за счет НВВ-процесса. Линия Li I 6707.8 Å отсутствует в спектре V1648 Aql, что указывает на принадлежность ее к звездам с исходной массой ниже $4 M_\odot$ [40].

В атмосфере выявлен значимый избыток кислорода: его относительное содержание $[\text{O}/\text{Fe}]_\odot = +1.36 \pm 0.26$. При меньшем избытке углерода $[\text{C}/\text{Fe}]_\odot = +0.75 \pm 0.10$ получаем отношение $\text{O}/\text{C} > 1$. Существенный избыток кислорода согласуется с тем фактом, что V1648 Aql является маломассивным сверхгигантом. Анализ спектров массивных звезд [41] показывает, что, в соответствии с теоретическими предсказаниями, эволюция массивной звезды приводит к дефициту кислорода, который в ходе CNO-цикла перерабатывается в азот. Таким образом, азот является принципиально важным элементом для надежного определения стадии эволюции звезды. В зарегистрированном спектральном диапазоне нам доступна лишь одна его линия — Ni I 7468 Å. Содержание азота $[\text{N}/\text{Fe}]_\odot = +0.69$ рассчитано на основе измеренной эквивалентной ширины этой довольно слабой линии, $W_\lambda = 22$ mÅ. Отношение $\text{O}/\text{N} > 1$ также подтверждает для V1648 Aql статус маломассивного сверхгиганта.

Содержание натрия мы определили по слабым субординатным линиям Na I 5682, 5688, 6154, 6160 Å, для которых минимальны поправки, вызванные отклонением от ЛТР [42]. Выявленный избыток натрия, $[\text{Na I}/\text{Fe}]_\odot = +0.38 \pm 0.16$, невелик и не превышает 3σ . Однако, учитывая содержания иных металлов α -процесса (Mg, Si, S, Ca), можно говорить о наличии их небольшого избытка, что присуще непроэволюционировавшим звездам с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}]_\odot < -0.5$ [43].

Таблица 4. Содержания химических элементов $\lg \varepsilon(X)$ в атмосфере V1648 Aql. Указана ошибка среднего содержания σ , полученная по числу линий n . Химический состав атмосферы Солнца взят из статьи [37]. В последнем столбце приведены относительные содержания в атмосфере родственной звезды V887 Her [38]

Солнце		V1648 Aql (данная работа)					V887 Her [38]
Elm	$\lg \varepsilon(E)$	X	$\lg \varepsilon(X)$	σ	n	$[X/Fe]_{\odot}$	$[X/Fe]_{\odot}$
C	8.39	C I	8.47	0.10	13	+0.75	+0.43
N	7.86	N I	7.88		1	+0.69	$\leq +0.46$
O	8.73	O I	9.42	0.26	3	+1.36	+0.77
Na	6.30	Na I	6.01	0.16	4	+0.38	+0.79
Mg	7.54	Mg I	7.43	0.16	3	+0.48	+0.45
Si	7.52	Si I	7.05	0.17	7	+0.20	+0.58
		Si II	7.41	0.14	2	+0.56	+0.10
S	7.14	S I	7.55	0.30	4	+1.08	+0.77
Ca	6.33	Ca I	5.87	0.14	13	+0.21	+0.05
Sc	3.07	Sc II	2.47	0.15	9	+0.07	-0.16
Ti	4.90	Ti I	4.26	0.45	3	+0.03	-0.07
		Ti II	4.26	0.14	12	+0.03	0.00
Cr	5.64	Cr I	5.12	0.16	9	+0.14	-0.02
		Cr II	5.14	0.09	17	+0.17	-0.19
Fe	7.45	Fe I	6.77	0.04	121	-0.01	0.00
		Fe II	6.80	0.09	26	+0.02	0.00
Ni	6.23	Ni I	5.61	0.13	9	+0.05	+0.17
Zn	4.62	Zn I	4.02	0.27	3	+0.17	+0.21
Y	2.21	Y II	1.15	0.25	4	-0.40	-0.58
Ba	2.17	Ba II	1.39	0.25	4	-0.11	-0.22
Ce	1.61	Ce II	0.79		1	-0.15	
Eu	0.52	Eu II	0.35	0.10	3	+0.50	+0.34

3.2.3. О селективном осаждении химических элементов

Для звезд с газопылевыми оболочками эффективным механизмом, создающим аномалии химического состава, может быть селективная сепарация химических элементов. В исследуемой нами звезде с избытком ИК-потока может происходить интенсивный обмен вещества атмосферы и околозвездной газопылевой оболочки, поскольку у V1648 Aql подходящая для этого процесса эффективная температура [44]. В целом анализ распространенности химических элементов осложняется тем, что на содержание отдельных элементов (CNO-элементы, тяжелые металлы) могут влиять как ядерные процессы в ходе эволюции звезды, так и селективное осаждение атомов на пылинки. Возможное влияние отклонений от ЛТР для всех химических элементов

из таблицы 4 не превышает 0.1 dex (см. статью [44] и ссылки в ней).

Зависимость полученных нами содержаний элементов $[X/H]$ из таблицы 4 от температуры конденсации T_{cond} из [37] на рис. 4 указывает на наличие умеренного селективного осаждения в системе V1648 Aql. Мы вправе ожидать одинакового поведения элементов с близкими значениями T_{cond} . Например, согласно [37], T_{cond} близка у кальция и скандия, а также у бария и церия. Действительно, как следует из таблицы 4 и рис. 4, у этих пар элементов относительные содержания близки.

На рис. 4 видим большое различие содержаний $[X/H]$ для серы и цинка с близкими значениями T_{cond} . В этой паре элементов важно содержание именно цинка, который, будучи слабо подверженным осаждению, не изменяет своего содержания в ходе ядерной эволюции данной звезды. Как было

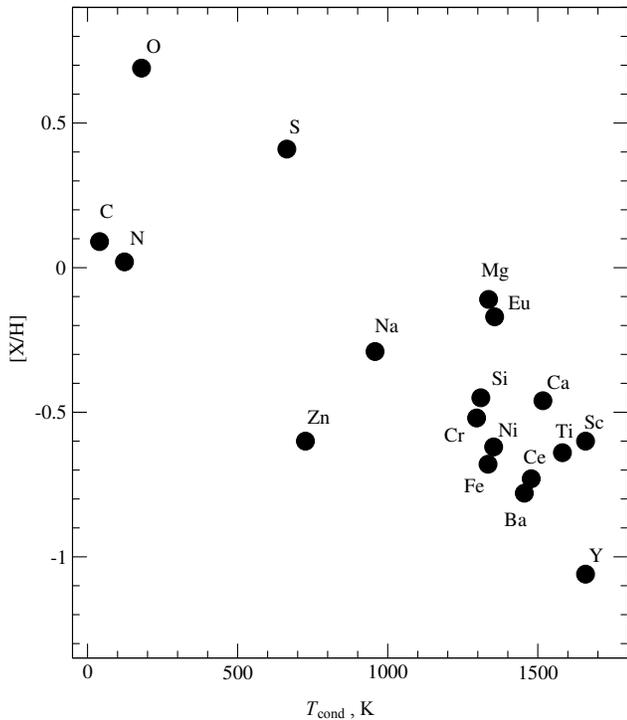


Рис. 4. Содержания химических элементов по отношению к солнечным $[X/H]_{\odot}$ в атмосфере V1648 Aql в зависимости от температуры конденсации T_{cond} из [37].

показано еще в 1991 г. Снеденом и др. [45], в большом диапазоне металличностей содержание цинка соответствует поведению железа, $[Zn/Met] = +0.04$. Вывод Снедена и др. уточнил результаты Мишениной и др. [46]: согласно этой работе, цинк соответствует металличности в широком диапазоне ее значений, $[Fe/H] = [-0.5; -3.0]$. В атмосфере V1648 Aql относительное содержание цинка $[Zn/Fe] = +0.17 \pm 0.27$, что свидетельствует о небольшом и статистически незначимом осаждении атомов железа.

Избыток серы, слабо подверженной селективной конденсации, $[X/H] = +0.41$, а по отношению к железу $[X/Fe]_{\odot} = +1.08$, что существенно выше избытков содержаний других элементов α -процесса. Большое различие относительных содержаний серы и цинка — распространенное явление для post-AGB-звезд и звезд типа RV Tau, объяснения которому пока нет [44]. Как видно на рис. 3 в статье [47], а также на рис. 5 и 6 в недавней публикации [48], это различие может достигать порядка величины и более. Как следует из статьи [47], большое отношение $[S/Zn]$ типично для звезд в толстом диске. Принадлежность V1648 Aql к популяции толстого диска подтверждается значением отношения $[Zn/H]_{\odot} = -0.6$ [44].

3.2.4. Тяжелые металлы

Избыток тяжелых металлов s -процесса (Y, Ba, Ce) в атмосфере V1648 Aql не обнаружен, что позволяет говорить о неэффективности третьего перемешивания. Отсутствие ожидаемого избытка тяжелых металлов по отношению к железу — факт, известный для post-AGB-сверхгигантов. Дефицит элементов s -процесса в атмосферах звезд на стадии post-AGB наблюдается гораздо чаще, чем избыток [25, 49–51]. Наличие или отсутствие избытка элементов s -процесса связано с исходной массой звезды и темпом потери массы на стадии AGB, определяющими ход эволюции конкретной звезды и массу звездного ядра [6]. Дефицит тяжелых металлов в атмосфере изучаемой нами звезды можно было предвидеть вследствие принадлежности IRAS 19386+0155 к источникам типа O-rich, поскольку избыток элементов s -процесса обычно сочетается с избытком углерода в атмосфере звезды с оболочкой, обогащенной углеродом [25].

Найденный избыток европия $[X/Fe]_{\odot} = 0.50$, синтезируемого преимущественно в реакциях быстрого присоединения нейтронов (r -процесс), является типичным для атмосфер post-AGB-звезд (см. примеры в статьях [18, 50, 51]).

3.2.5. Заключение

Можно утверждать, что в совокупности полученные параметры — светимость, удаленность, металличность и особенности химического состава — согласуются с принадлежностью звезды к стадии post-AGB в толстом (или же, учитывая невысокую скорость звезды, в старом тонком) диске Галактики.

Подчеркнем отсутствие изменения эффективной температуры звезды с 2000 по 2017 гг., которое можно было бы ожидать в связи с наблюдаемым ростом видимого блеска [10]. Заметим, что параметры атмосферы и основные детали химического состава двух высокоширотных post-AGB-звезд V1648 Aql и V887 Her [19, 38], сопоставленные в таблице 4, подтверждают сходство двух объектов. Однако у них принципиально различается распределение энергии: в отличие от V1648 Aql, V887 Her имеет типичное для post-AGB-звезд двугорбое распределение. По совокупности параметров близкими объектами являются также расположенные вне плоскости Галактики LN Hya [20, 44, 47] и центральная звезда ИК-источника IRAS 18025 – 3906 [48].

На основании особенностей аномального SED авторы [13] сделали еще один принципиальный вывод: вероятно присутствие в системе V1648 Aql околосредного пылевого диска, что может свидетельствовать о наличии компонента в системе.

Учитывая еще и аномальную переменность блеска звезды [10, 11], необходимо выполнить спектральный мониторинг для поиска переменности спектра, поля скоростей и выявления возможной двойственности звезды.

4. ВЫВОДЫ

На 6-м телескопе БТА в сочетании с эшелльным спектрографом НЭС ($R \geq 60\,000$) получен оптический спектр V1648 Aql — центральной звезды ИК-источника IRAS 19386+0155, что позволило впервые изучить кинематическое состояние ее протяженной атмосферы, околосредной оболочки и межзвездной среды в направлении объекта.

Лучевая скорость, измеренная по многочисленным абсорбциям металлов, составляет $V_r = 10.18 \pm 0.05$ км с⁻¹. Усредненная по набору из 20 отождествленных в спектре DIBs скорость — $V_r = -12.5 \pm 0.2$ км с⁻¹. На профиле D-линий Na I выделены три отдельных компонента:

- длинноволновый, $V_r = 9.2$ км с⁻¹, положение которого совпадает с усредненным положением абсорбций металлов, формируется в атмосфере звезды;
- самый коротковолновый, $V_r = -12.8$ км с⁻¹, положение которого совпадает с усредненным значением скорости по набору из двадцати DIBs, формируется в межзвездной среде;
- компонент со скоростью $V_r = -3.4$ км с⁻¹, смещенный в коротковолновую область на 12.6 км с⁻¹ относительно средней лучевой скорости по атмосферным абсорбциям, формируется в околосредной оболочке, расширяющейся с типичной для post-AGB-звезд скоростью.

В спектре зафиксированы узкие эмиссии с интенсивностью около 10% от уровня местного континуума, отождествленные нами с низковозбужденными линиями атомов металлов. Их смещенное относительно абсорбций положение, среднее значение $V_r = 8.7 \pm 0.3$ км с⁻¹, указывает на наличие слабого градиента скорости в верхних слоях атмосферы звезды.

Интенсивность триплета кислорода O I 7773 Å соответствует светимости $M_V \approx -5^m$. В отсутствие надежного параллакса звезды получена нижняя оценка расстояния $d \geq 1.8$ кпк с учетом межзвездного и околосредного покраснения.

Методом моделей атмосфер определены значения фундаментальных параметров и содержания 18 химических элементов в атмосфере, подтверждающие для V1648 Aql статус post-AGB-звезды.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы базы астрономических данных SIMBAD, SAO/NASA ADS, VALD и Gaia DR2.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарят за частичную финансовую поддержку Российский фонд фундаментальных исследований (проект 18-02-00029 а).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. E. C. J. Veen, H. J. Habing, and T. R. Geballe, *Astron. and Astrophys.* **226**, 108 (1989).
2. B. M. Lewis, J. Eder, and Y. Terzian, *Astrophys. J.* **362**, 634 (1990).
3. B. M. Lewis, *Astrophys. J.* **533**, 959 (2000).
4. T. M. Gledhill, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356**, 883 (2005).
5. T. Blöcker, *Astron. and Astrophys.* **297**, 727 (1995).
6. F. Herwig, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43**, 435 (2005).
7. M. Di Criscienzo, P. Ventura, D.A. García-Hernández, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462**, 395 (2016).
8. N. Liu, R. Gallino, S. Bisterzo, et al., *Astrophys. J.* **865**, 112 (2018).
9. O. Suarez, P. García-Lario, A. Machado, et al., *Astron. and Astrophys.* **458**, 173 (2006).
10. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, and G. V. Komissarova, *Astronomy Letters* **36**, 269 (2010).
11. B. J. Hrivnak, W. Lu, and K. A. Nault, *Astron. J.* **149**, 184 (2015).
12. H. J. Brivnak, S. Kwok, and K. M. Volk, *Astrophys. J.* **331**, 832 (1988).
13. C. B. Pereira, S. Lorenz-Martins, and M. Machado, *Astron. and Astrophys.* **422**, 637 (2004).
14. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61**, 820 (2017).
15. M. V. Yushkin and V. G. Klochkova, Preprint № 206, SAO RAS (Special Astrophysical Observatory RAS, 2004).
16. G.A. Galazutdinov, Preprint № 92, SAO RAS (Special Astrophysical Observatory RAS, 1992).
17. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavoljanskaya, and M. V. Shapovalov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 162 (2007).
18. R. E. Molina, S. Giridhar, C. B. Pereira, et al., *Revista Mexicana Astronom. Astrofis.* **50**, 293 (2014).
19. V. G. Klochkova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **272**, 710, (1995).

20. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **56**, 104 (2012).
21. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavalzhanskaya, *Astronomy Reports* **62**, 623 (2018).
22. P. Jenniskens and F.-X. Désert, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **106**, 39 (1994).
23. R. Luna, N. L. J. Cox, M. A. Satorre, et al., *Astron. and Astrophys.* **480**, 133 (2008).
24. E. Bakker, E. F. van Dishoeck, L. B. F. M. Waters, and T. Schoenmaker, *Astron. and Astrophys.* **323**, 469 (1997).
25. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 279 (2014).
26. J. Kos and T. Zwitter, *Astrophys. J.* **774**, 72 (2013).
27. R. E. Molina, *Revista Mexicana Astronom. Astrofis.*, **54**, 397 (2018).
28. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **46**, 139 (2002).
29. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **74**, 41 (2019).
30. Y. Takeda, G. Jeong, and I. Han, *Publ. Astron. Soc. Japan* id.8 (2018).
31. T. Blöcker, *Astron. and Astrophys.* **299**, 755 (1995).
32. V. V. Kovtyukh, N. I. Gorlova, and S. I. Belik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423**, 3268 (2012).
33. S. B. Vickers, D. J. Frew, O. A. Parker, and I. S. Bojicic, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, 1673 (2015).
34. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **112**, 525 (1995).
35. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **138**, 119 (1999).
36. V. V. Tsymbal, *ASP Conf. Ser.* **108**, 198 (1996).
37. K. Lodders, in: *Principles and Perspectives in Cosmochemistry* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010), p. 379 (*Astrophysics and Space Science Proc.*).
38. T. Sahin, D. Lambert, V. G. Klochkova, and N.S. Tavalzhanskaya, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **410**, 612, (2011).
39. D.A. Garcia-Hernandez, O. Zamora, A. Yagüe, et al., *Astron. and Astrophys.* **555**, id.L3 (2013).
40. P. Ventura and F. D'Antona, *Astron. and Astrophys.* **439**, 1075 (2005).
41. K. Venn, *Astrophys. J.* **414**, 316 (1993).
42. K. Lind, M. Asplund, P. S. Barklem, and A. K. Belyaev, *Astron. and Astrophys.* **528**, A103 (2011).
43. J. C. Wheeler, C. Sneden, and J. W. Jr. Truran, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **27**, 279 (1989).
44. S. Sumangala Rao, S. Giridhar, and D. L. Lambert, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **419**, 1254, (2012).
45. C. Sneden, R. G. Cratton, and D. A. Crocker, *Astron. and Astrophys.* **246**, 354 (1991).
46. T. V. Mishenina, V. V. Kovtyukh, C. Soubiran, et al., *Astron. and Astrophys.* **396**, 189 (2002).
47. Y. Takeda, H. Taguchi, K. Yoshioka, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, 1127 (2007).
48. R. E. Molina, C. B. Pereira, and A. Arellano Ferro, *astro-ph-SR*. 1901.058 (2019).
49. V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 5 (1997).
50. H. van Winckel and M. Reyniers, *Astron. and Astrophys.* **354**, 135 (2000).
51. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **60**, 344 (2016).

Optical Spectrum of Distant OH/IR Star V1648 Aql (IRAS 19386+0155)

V. G. Klochkova and N. S. Tavalzhanskaya

We present an optical spectrum of the star V1648 Aql (IRAS 19386+0155) obtained at the 6-m SAO RAS telescope with a spectral resolution of $R \geq 60\,000$. Heliocentric radial velocity was measured from numerous metal absorptions is $V_r = 10.18 \pm 0.05 \text{ km s}^{-1}$ ($V_{\text{LSR}} = 18.1 \text{ km s}^{-1}$). We determined the atmospheric, circumstellar, and interstellar components in the profile of the Na I D lines at $V_r = 9.2, -3.4$, and -12.8 km s^{-1} respectively. The averaged over 20 identified DIBs velocity $V_r = -12.5 \pm 0.2 \text{ km s}^{-1}$ coincides with the interstellar Na I component. Weak emissions with an intensity of about 10% of the local continuum level were detected in the spectrum; they are identified as low-excitation metal lines. Their central position, $V_r = 8.44 \pm 0.28 \text{ km s}^{-1}$, points to the presence of a weak velocity gradient in the upper layers of the stellar atmosphere. Based on the spectroscopic data and taking into account the interstellar and circumstellar reddening, we estimated the star's luminosity $M_V \approx -5^{\text{m}}$ and also obtained the lower estimate of distance $d \geq 1.8 \text{ kpc}$. Using the model atmosphere method, we determined the fundamental parameters and chemical abundances in the atmosphere confirming the status of a post-AGB star for V1648 Aql.

Keywords: *stars: evolution—stars: individual: V1648 Aql—stars: AGB and post-AGB*