

ОБ ЭВОЛЮЦИОННОМ СТАТУСЕ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ V534 Lyr

© 2018 В. Г. Клочкова*, Е. Г. Сендзикас, Е. Л. Ченцов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 17 октября 2017 года; принята в печать 2 ноября 2017 года

На основании мониторинга, проведенного на 6-м телескопе БТА с высоким спектральным разрешением, детально изучен оптический спектр высокоширотной переменной V534 Lyr. Во все даты наблюдений были измерены гелиоцентрические лучевые скорости V_r , соответствующие положению всех компонентов абсорбций металлов, а также D-линий Na I и H α . Анализ поля скоростей по линиям различной природы выявил малоамплитудную переменность V_r по линиям с высоким потенциалом возбуждения, которые формируются в глубоких слоях звездной атмосферы, и позволил оценить системную скорость $V_{\text{sys}} \approx -125 \text{ км с}^{-1}$ ($V_{\text{lsr}} \approx -105 \text{ км с}^{-1}$). Оценка расстояния $d \approx 6 \text{ кпк}$ для звезды приводит к значению ее абсолютной величины: $M_V \approx -5^{\text{m}}3$, что соответствует спектральной классификации. Обнаружен неизвестный ранее для этой звезды спектральный феномен: в отдельные моменты наблюдается раздвоение профилей низковозбужденных абсорбций, достигающее значений: $\Delta V_r = 20\text{--}50 \text{ км с}^{-1}$. Совокупность параметров: пониженная металличность $[\text{Met}/\text{H}]_{\odot} = -0.28$, высокое содержание азота $[\text{N}/\text{Fe}] = +1.10$, большая пространственная скорость, высокая светимость, сильная переменность эмиссионно-абсорбционных профилей линий H I, раздвоение абсорбций металлов в отдельные моменты наблюдений и переменность поля скоростей в атмосфере — позволяют отнести V534 Lyr к пульсирующим звездам в толстом диске Галактики.

Ключевые слова: *сверхгиганты — звезды: индивидуальные: V534 Lyr*

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение двух последних десятилетий на 6-м телескопе БТА выполняется исследование спектров сверхгигантов с большими избытками ИК-излучения, предположительно находящихся на стадии асимптотической ветви гигантов AGB и post-AGB. Программа включает и изучение некоторых родственных звезд с неясным эволюционным статусом. На стадии post-AGB наблюдаются далеко проэволюционировавшие звезды малых и промежуточных масс, с исходными массами на главной последовательности менее $8\text{--}9 M_{\odot}$. На предшествующей AGB стадии эти звезды представляют собой холодные (с эффективной температурой $T_{\text{eff}} \approx 3000\text{--}5000 \text{ К}$) красные сверхгиганты. После истощения гелия в ядре AGB-звезды с исходной массой в интервале $2\text{--}4 M_{\odot}$ образуется вырожденное углеродно-кислородное ядро, окруженное попеременно энергетически активными слоями горения He и H. Большую часть времени энерговыделение обеспечивает водородный слой, однако по мере присоединения продуктов горения водорода к гелиевому слою в последнем происходит кратковременное возгорание гелия. Дан-

ная конфигурация внутреннего строения звезды неустойчива, теория предсказывает достаточно эффективное перемешивание и вынос (за счет проникающей конвекции) в атмосферу звезды тяжелых металлов, синтезированных в ядерных реакциях, сопровождающих указанные процессы энерговыделения (см. обзор [1] и ссылки в нем).

Нашей исходной целью было определение фундаментальных параметров исследуемых звезд и поиск аномалий химического состава их атмосфер, связанных с синтезом химических элементов на предшествующих стадиях эволюции. По мере выполнения программы возникла необходимость дополнительных исследований, направленных на поиск переменности со временем спектральных деталей и поля скоростей в атмосферах и оболочках изучаемых звезд. Такое расширение задачи потребовало проведения для каждого объекта программы многократных наблюдений с высоким спектральным разрешением в широком интервале длин волн. Основные результаты, полученные нами по данным спектроскопии на БТА, суммированы в ряде недавних публикаций [2–4]. Кратко отметим наиболее важные из них. Во-первых, определены параметры и химический состав атмосфер для нескольких десятков звезд с избытками ИК-

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

потока. Во-вторых, для семи звезд найдены эволюционные изменения химического состава (большие избытки элементов s -процесса или hot-bottom-процесса) [5–9]. На основе изученной нами и авторами статьи [10] репрезентативной выборки звезд мы сформировали подвыборку post-AGB-звезд с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами s -процесса, и с обогащенными углеродом околозвездными оболочками. Анализ свойств этой подвыборки привел нас к выводу о взаимосвязи peculiarity профилей линий, проявляющейся в наличии эмиссионного компонента в D-линиях дублета Na I, в характере молекулярных деталей, асимметрии, разрешенных или запрещенных эмиссиях металлов, формирующихся в оболочках, и в расщеплении профилей сильных абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня, с кинематическими и химическими свойствами околозвездной оболочки и с типом ее морфологии [2].

Присутствие вышеперечисленных деталей является главным отличием спектров post-AGB-звезд от спектров массивных сверхгигантов. Обнаруженное нами расщепление на компоненты профилей сильнейших абсорбций тяжелых металлов в спектрах избранных post-AGB-сверхгигантов позволило заключить, что процесс формирования структурированной околозвездной оболочки сопровождается обогащением продуктами звездного нуклеосинтеза [3]. Переменность наблюдаемых профилей абсорбционно-эмиссионной линии $H\alpha$ и линий металлов, а также регистрируемая у нескольких объектов смена типа (абсорбция/эмиссия) полос Свана молекулы C_2 вызваны изменениями параметров или структуры околозвездной оболочки. Тип профиля $H\alpha$ (чисто абсорбционный, чисто эмиссионный, типа P Cyg или инверсного P Cyg, с двумя эмиссионными компонентами в крыльях) не связан с химическим составом атмосферы центральной звезды. Основными факторами, влияющими на тип профиля $H\alpha$ и его переменность, являются темп потери вещества, скорость звездного ветра, кинематика и оптическая толща оболочки.

Найдены неизвестные ранее в оптических спектрах звезд-AGB-кандидатов особенности. В частности, на основании наблюдений, также выполненных с эшелльным спектрографом НЭС БТА, изучены особенности спектра и поля скоростей в атмосфере и оболочке холодного AGB-сверхгиганта V 1027 Cyg [11] — оптического компонента ИК-источника IRAS 20004+2955. Впервые в спектре этой звезды обнаружено расщепление ядер сильных абсорбций металлов и их ионов (Si II, Ni I, Ti I, Ti II, Sc II, Cr I, Fe I, Fe II, Ba II). Широкий профиль этих линий содержит в ядре стабильно расположенную слабую эмиссию,

положение которой можно рассматривать в качестве скорости центра масс системы (для краткости далее — системная скорость) $V_{\text{sys}} = 5.5 \text{ км с}^{-1}$. По симметричным абсорбциям малой и умеренной интенсивности выявлены слабые изменения лучевой скорости с амплитудой 5–6 км с^{-1} , обусловленные пульсациями. В спектре звезды наблюдается длинноволновое смещение профиля $H\alpha$, вызванное искажением ядра линии. В красной области спектра отождествлены многочисленные слабые линии молекулы CN и линия KI 7696 Å, обладающая профилем типа P Cyg. Совпадение лучевой скорости, измеренной по симметричным абсорбциям металлов и по линиям CN, указывает на формирование спектра CN в атмосфере звезды. Отождествлены многочисленные межзвездные полосы, DIBs, положение которых в спектре, $V_r(\text{DIBs}) = -12.0 \text{ км с}^{-1}$, соответствует скорости межзвездной среды в Локальном рукаве Галактики.

Абсолютно новые результаты получены для слабой безымянной звезды [12], которая ассоциирована с мощным источником ИК-излучения RAFGL 5081. На основании долговременного спектрального мониторинга с высоким спектральным разрешением ее оптический спектр изучен впервые. Сделаны оценки спектрального класса звезды $Sp \approx G5-8 \text{ II}$ и эффективной температуры $T_{\text{eff}} \approx 5400 \text{ К}$. Обнаружен трудно объяснимый спектральный феномен: раздвоение профилей стационарных абсорбций средней и малой интенсивности. Стационарность абсорбций исключает возможность объяснения двойных пиков вследствие спектральной двойственности звезды. Лучевые скорости для ветровых составляющих профилей D-линий Na I и $H\alpha$ достигают значений -250 км с^{-1} и -600 км с^{-1} соответственно. Эти профили содержат узкие компоненты, количество, глубины и положения которых изменяются со временем. Переменная во времени многокомпонентная структура профилей D-линий Na I и $H\alpha$ указывает на неоднородность и нестабильность околозвездной оболочки RAFGL 5081. По наличию у профилей линий Na I(1) компонентов со скоростью $V_r(\text{IS}) = -65 \text{ км с}^{-1}$ сделан вывод о том, что RAFGL 5081 находится за рукавом Персея, т.е. не ближе 2 кпк. Отмечено, что данный объект ассоциирован с отражательной туманностью GN 02.44.7. Поставлена задача проведения фотометрического мониторинга для определения параметров переменности центральной звезды RAFGL 5081.

В исследовании источников с большими избытками ИК-потока мы выявили звезды вне ожидаемых стадий AGB и post-AGB. Оказалось, что среди таких объектов, помимо AGB- и post-AGB-звезд, присутствуют массивные звезды предельно

высокой светимости с протяженными и структурированными околосветными оболочками. Наиболее известным объектом, который много лет рассматривали предпочтительно как звезду на стадии post-AGB, является звезда V 1302 Aql, обладающая многочисленными пекулярностями спектра. Долгое время эволюционный статус этого сверхгиганта, ассоциированного с мощным источником ИК-излучения IRC+10420, был неясен. Совокупность наблюдаемых свойств V 1302 Aql позволяла рассматривать ее как звезду на стадии post-AGB или как очень массивную звезду, прошедшую стадию красного сверхгиганта. Очевидно, что в зависимости от принятого статуса, а следовательно, и светимости объекта, оценка его удаленности от наблюдателя может различаться в несколько раз. Один из решающих аргументов, подтверждающий для V 1302 Aql статус массивной проэволюционировавшей звезды, мы получили при анализе спектральных данных 6-м телескопа, когда был впервые определен химический состав ее атмосферы и найден значительный избыток азота [13]. Обнаружение быстрого роста эффективной температуры [13, 14] позволило предположить, что звезда быстро эволюционирует с темпом увеличения T_{eff} около 120 K за год. Данный феномен явился для нас стимулом к продолжению спектрального мониторинга этого загадочного объекта. При изучении спектров V 1302 Aql за период наблюдений 1992–2014 гг. был сделан вывод о том, что желтый гипергигант вошел в фазу замедления (или прекращения) роста эффективной температуры и приблизился на диаграмме Г–Р к высокотемпературной границе Желтого Войда [15]. Здесь уместно упомянуть и звезду HD 179821, которая несколько десятилетий фигурировала в статьях в качестве post-AGB-кандидата, и лишь детальный анализ высококачественных данных многолетнего спектрального мониторинга с эшелльными спектрографами 6-м телескопа CAO и 2.7-м телескопа обсерватории МакДональд (США) привел к заключению о ее принадлежности к семейству проэволюционировавших массивных звезд [16].

Опыт, полученный в ходе анализа спектров звезд различной светимости и массы, позволяет нам надеяться на успех и при изучении звезд с неясным эволюционным статусом. Объектом настоящего исследования является звезда V534 Lyr (HD 172324, HIP 91359), расположенная на галактической широте $b = 18^{\circ}58'$. Наш интерес к этой относительно яркой ($V = 8^{\text{m}}16$) звезде обусловлен тем, что Трамс и другие [17] включили V534 Lyr в список звезд высокой светимости на высоких широтах Галактики (HGL). Большую часть исследованных объектов эти авторы отнесли к post-AGB-кандидатам. Однако из-за отсутствия сведений об ИК-потоке V534 Lyr была названа ими лишь

предполагаемым кандидатом в post-AGB. Дополнительным стимулом к исследованию V534 Lyr для нас служит эмиссия в линиях H I, обнаруженная еще в ранней работе Бонсака и Гринстейна [18] и подтвержденная позднее [19]. Эту звезду изучали неоднократно с помощью различных фотометрических систем [20–22] и спектральными методами, но к настоящему времени ни в одной из имеющихся публикаций нет определенного вывода о ее эволюционном статусе (см. таблицу 1, в которой указаны основные работы [19, 23, 24], касающиеся исследования V534 Lyr).

Целью данной работы является определение по высококачественным оптическим спектральным данным основных параметров V534 Lyr, поиск возможной временной переменности спектра и картины лучевых скоростей в атмосфере звезды и уточнение ее эволюционного статуса. В разделе 2 мы кратко описываем используемые наблюдательные данные и детали их обработки. Полученные по спектрам высокого разрешения сведения об особенностях спектра и обнаруженных деталях профилей приведены в разделе 3. Здесь же сделана попытка применить наши данные для определения светимости, удаленности и эволюционного статуса звезды, а также представлена методика определения параметров звездной атмосферы и расчета содержаний химических элементов. В разделе 4 обсуждаются результаты работы. Основные выводы суммируются в заключительном разделе 5.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

В настоящей работе использованы семь спектров V534 Lyr высокого разрешения ($R = 60\,000$), полученных с помощью эшелле-спектрографа НЭС [25] 6-м телескопа БТА в произвольные даты в 2010 и 2017 гг., а также самый ранний из наших спектров, который был получен 8 июля 2000 г. с эшелльным спектрографом PFES в первичном фокусе БТА с более низким разрешением $R = 15\,000$ [26, 27], что наложило ограничения на его использование. Экстракция одномерных спектров из двумерных эшелле-кадров выполнена с помощью модифицированного варианта [28] контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS. Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух спектров, полученных последовательно один за другим. Калибровка по длинам волн осуществлялась с использованием спектров Th-Ag лампы с полым катодом. Для последующей спектрофотометрической и позиционной обработки одномерных спектров применялась модифицированная версия программы DECH20t [29]. Контроль инструментального согласования спектров звезды и лампы с полым

Таблица 1. Некоторые ранее опубликованные результаты исследований V534 Lyr

| Методика | Результаты | Статус | Ссылка |
|--|--|-------------------------------|--------|
| ИК-фотометрия | Отсутствие ИК-избытка | Post-AGB-звезда ? | [23] |
| Оптическая спектроскопия, метод моделей атмосфер | M_V , V_r , химический состав | Post-AGB-звезда ? | [19] |
| Оптическая спектроскопия, метод моделей атмосфер | Переменность V_r и профилей H I, химический состав | Высокоскоростная HGL-звезда ? | [24] |

катодом выполнен по теллурическим линиям [O I], O₂ и H₂O. Более детально процедура измерения лучевой скорости V_r по спектрам, полученным со спектрографом НЭС, и источники ошибок описаны в статье [30]. Среднеквадратичная погрешность измерений V_r для звезд с узкими абсорбциями в спектре не превышает 1.0 км с⁻¹ (точность по одной линии [30]). Исходные данные, касающиеся полученных спектров, представлены в трех первых столбцах таблицы 2.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Особенности спектра V534 Lyr

Особенностью оптического спектра V534 Lyr является мощная эмиссия профиля H α , что отмечалось во всех статьях, касающихся спектроскопии этой звезды (см, например, [19, 24] и ссылки в них). Линия H α , которая присутствует в семи из восьми наших спектров, является самой интенсивной. Вариации ее профиля с двухпиковой эмиссией значительны. В самом раннем спектре (8 июля 2000 г.) весь эмиссионный профиль расположен выше континуума. Однако в последующих спектрах ядро абсорбционного компонента, который формируется в поверхностных слоях атмосферы, опускается ниже уровня континуума. Меняется положение абсорбционного компонента, а также интенсивности и положения эмиссионных компонентов, но интенсивность длинноволнового пика всегда выше коротковолнового (рис. 1). Сдвиг синей границы абсорбционного компонента относительно вертикальной штриховой линии, соответствующей V_{sys} , усиливается в спектре от 24 сентября 2010 г.: $V_r - V_{sys} \approx -50$ км с⁻¹.

Кардинальное изменение профиля наблюдается в спектре 2017 г. Вместо двухпикового видимый профиль типа P Cyg, абсорбционный компонент которого сдвинут на $V_r - V_{sys} \approx -70$ км с⁻¹. Профиль H β зарегистрирован в меньшее число дат, но и этого достаточно, чтобы заметить, как более сильный из эмиссионных компонентов переходит с красного крыла на синее (рис. 2). Подобные же вариации профилей H α и H β в спектре V534 Lyr

были найдены в работе [24]. Как видно на рис. 2, в спектре, полученном 8 июня 2017 г., наблюдалось изменение типа профиля у H β на тип P Cyg с максимальным смещением абсорбционного компонента. А спустя несколько дней, 13 июня 2017 г., видим раздвоение абсорбционного компонента H β , причем в отсутствие изменений профиля H α .

Отметим, что для спектра V534 Lyr характерно усиление линий нейтрального гелия He I при существенном ослаблении линий железа. Это хорошо иллюстрирует верхняя панель рис. 3, где фрагмент спектра этой звезды с линией He I 4026 Å сопоставлен с аналогичным участком спектра массивного сверхгиганта α Cyg. МК-спектральный класс α Cyg — A2 Ia, близок к V534 Lyr, но интенсивности линии He I 4026 Å заметно различаются.

3.2. Картина лучевых скоростей

Обобщенные результаты измерения лучевых скоростей для каждого момента наблюдений представлены в таблице 2. Колонки (5)–(8) содержат величины, полученные усреднением скоростей для: эмиссий Fe II 6318, 6384 и 6385 Å, в спектрах 2017 г. к ним добавились эмиссии Fe II 6493, 7496, 7513 Å, ядер абсорбций He I, S II и ядер абсорбций дублета Si II (2), ядер компонентов абсорбций Fe II соответственно. В последнем столбце приведена скорость по линиям Fe II с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня. В спектрах для четырех дат эти линии расщеплены на два компонента, поэтому даны два средних значения скорости: по длинноволновым компонентам и ниже этих значений указана средняя скорость по коротковолновым компонентам. Подчеркнем, что расщепление для всех моментов, когда оно присутствует в спектре, достигает больших значений: $\Delta V_r = 20$ – 50 км с⁻¹. В спектре 2000 г. из-за его пониженного спектрального разрешения измерения компонентов абсорбций ненадежны. По этой причине данные для этого спектра не приводятся на рис. 4, где представлены зависимости лучевой скорости от центральной остаточной интенсивности соответствующей линии, $V_r(r)$. Каждой линии

Таблица 2. Моменты наблюдений, зарегистрированный спектральный интервал, эффективная температура и значения лучевой скорости, усредненные для различных групп спектральных линий. В двух последних колонках даны средние значения V_r по линиям ионов железа с высокими (high) и низкими (low) потенциалами возбуждения нижнего уровня

| Дата | UT | $\Delta\lambda$, nm | T_{eff} , K | V_r , км с ⁻¹ | | | |
|------------|-------|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------|-----------------|---------------------------------------|
| | | | | эмиссии | абсорбции | | |
| | | | | | Fe II | He I+S II+Si II | Fe II (high) |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| 08.07.2000 | 17:23 | 430–780 | | -131 | -140 | -145: | -143:, -154 ¹ |
| 06.04.2010 | 01:18 | 516–669 | 10100 | -131 | -131 | -132 | -103 |
| | | | | | | | -152 |
| 01.06.2010 | 23:56 | 522–669 | 10250 | -123 | -120 | -120 | -107 |
| | | | | | | | -156 |
| 30.07.2010 | 23:41 | 443–593 | 10300 | | -124 | -125 | -125 |
| 24.09.2010 | 20:01 | 522–669 | 10800 | -127 | -130 | -130 | -128 |
| 12.10.2013 | 17:10 | 392–698 | 9750 | -114 | -120 | -108 | -109 |
| | | | | | | | -146 |
| 08.06.2017 | 00:01 | 470–778 | 10250 | -134 | -130 | -134 | -134 |
| 13.06.2017 | 21:12 | 470–778 | | -134 | -129 | -133 | -119 ² , -113 ¹ |
| | | | | | | | -140 ² , -152 ¹ |

¹ — среднее значение V_r по линиям Fe II (42),

² — среднее значение V_r по линиям Fe II (мультиплеты 48, 49, 74).

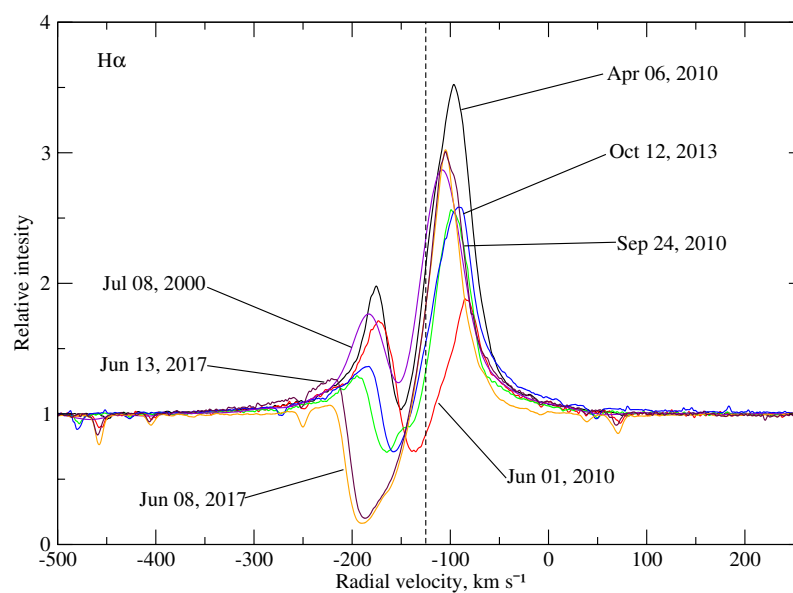


Рис. 1. Профили линии $H\alpha$ в разные моменты наблюдений. Штриховая вертикальная линия — принятая системная скорость $V_{\text{sys}} \approx -125$ км с⁻¹.

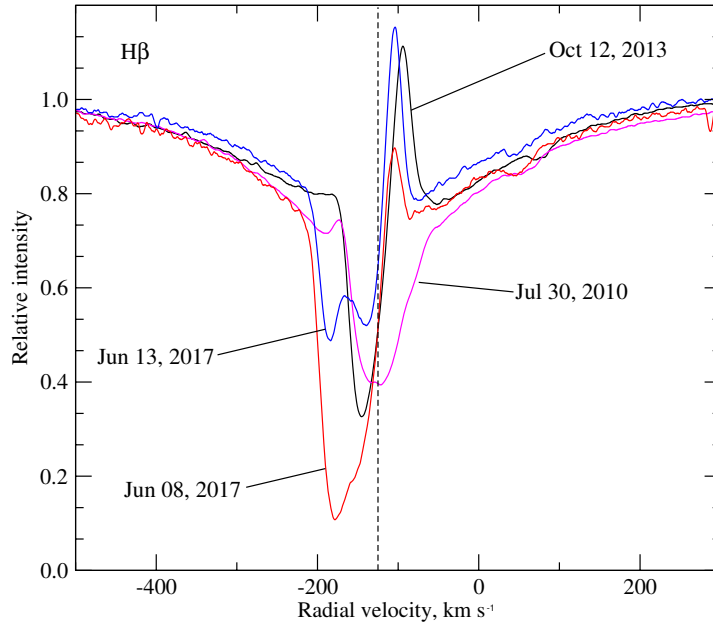


Рис. 2. То же, что на рис.1, но для линии $H\beta$.

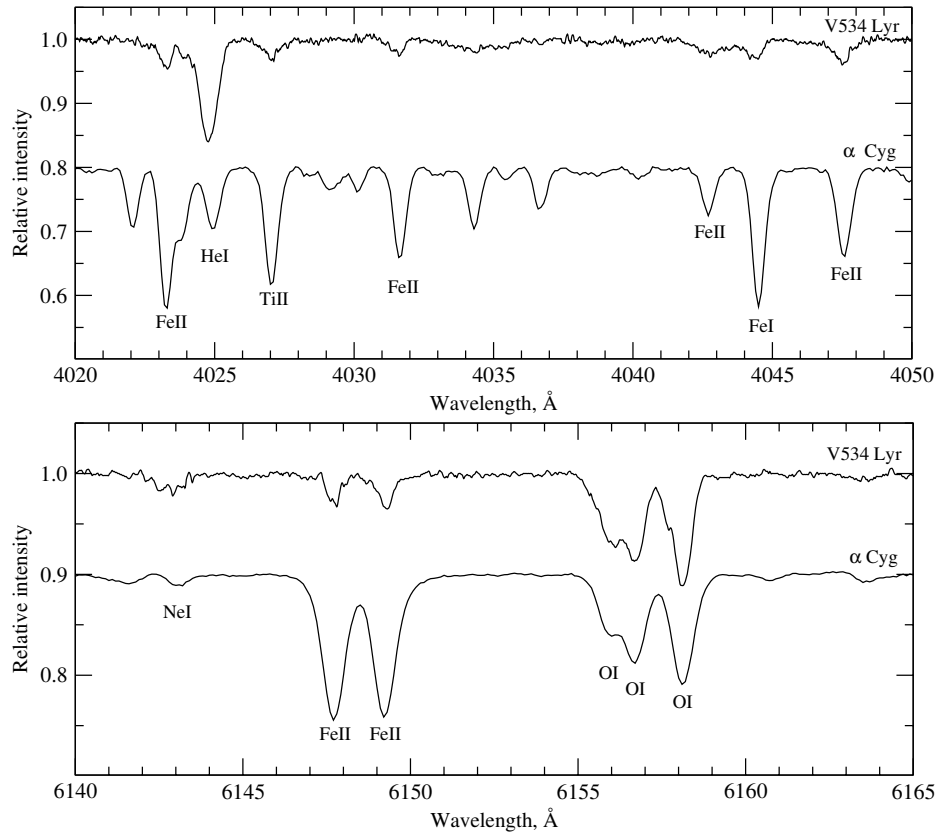


Рис. 3. Сопоставление фрагментов спектра V534 Лур с аналогичными фрагментами спектра массивного сверхгиганта α Cyg. Отождествлены основные абсорбции фрагмента.

соответствует один или два (в случаях раздвоенных абсорбций) значка. Кружки — абсорбции Fe II высокого возбуждения, квадратики — абсорбции Fe II низкого возбуждения, колечки — He I, S II, горизонтальные черточки — в основном эмиссии Fe II 6318, 6384, 6385 Å, а в спектрах 2017 г. — еще и эмиссии Fe II 6493, 7496, 7513 Å. Указанные эмиссии Fe II формируются в протяженных оболочках и, будучи стационарными у некоторых сверх- и гипергигантов, используются для оценки их системных скоростей V_{sys} [31]. У исследуемой звезды V534 Lyr по нашим данным найденные по эмиссиям скорости в разные даты 2010 г. различаются примерно на 5 км с^{-1} , причем разные линии смещаются на разные величины, но все в одну сторону. В спектре 2013 г. положение этих эмиссий существенно отличается от предыдущих. При этом в каждую из дат положение эмиссий близко к таковым для нерасщепленных абсорбций, поэтому скорости в колонке (5) близки к скоростям в колонке (6), измеренным по верхним частям абсорбций.

Полуширина линии Mg II 4481 Å в спектре V534 Lyr составляет $\delta\lambda = 0.5 \text{ Å}$. С использованием зависимости полуширины этой линии от скорости вращения звезды из работы [32] получаем низкую скорость вращения $v \sin i = 5\text{--}6 \text{ км с}^{-1}$.

Таблица 2 и рис. 4 показывают изменения со временем положений всех линий и формы профилей некоторых из них. Последнее явление связано преимущественно с верхними слоями атмосферы. Это видно, например, из того, что абсорбции Fe II низкого возбуждения в спектрах, полученных 6 апреля 2010 г., 1 июня 2010 г. и 12 октября 2013 г., раздвоены, а формирующиеся глубже абсорбции высокого возбуждения остаются одиночными в эти даты. Рисунок 5 демонстрирует это для линий Fe II 5363 и 5506 Å (потенциалы нижних уровней 3.2 eV и 10.2 eV соответственно), а рис. 6 — для линий Fe II 5169 Å, самой сильной из низковозбужденных абсорбций в видимой части спектра (у нее потенциал нижнего уровня 2.9 eV), и Si II 6371 Å (потенциал нижнего уровня 8.1 eV). На нижних фрагментах рис. 5 (30 июля 2010 г. и 24 сентября 2010 г.) профиль Fe II 5363 Å лишь слегка асимметричен, а на верхнем (6 апреля 2010 г.) он расщеплен на два компонента, близких по глубине и отстоящих друг от друга на 48 км с^{-1} . Профиль Fe II 5169 Å (рис. 6) от 6 апреля 2010 г. также состоит из двух компонентов, но разной глубины, раздвинутых на 56 км с^{-1} . На рис. 6 показан промежуточный случай трансформации профиля. Абсорбция Si II 6371 Å (потенциал нижнего уровня 8.1 eV) в результатах наблюдений, проведенных

Таблица 3. Параметры некоторых абсорбций в спектре V534 Lyr: глубины R , ширины δV_r , км с^{-1} , и эквивалентные ширины W_λ , Å

| Параметр | Дата | | |
|--------------|-----------|------------|------------|
| | 6.04.2010 | 30.07.2010 | 24.09.2010 |
| Fe II 5506 | | | |
| R | 0.037 | 0.039 | 0.036 |
| δV_r | 66 | 52 | 45 |
| W_λ | 0.030 | 0.026 | 0.022 |
| Fe II 5363 | | | |
| R | 0.030 | 0.075 | 0.045 |
| δV_r | 85 | 62 | 49 |
| W_λ | 0.030 | 0.055 | 0.031 |
| Fe II 5169 | | | |
| R | 0.140 | 0.370 | |
| δV_r | 108 | 78 | |
| W_λ | 0.120 | 0.274 | |
| Si II 6371 | | | |
| R | 0.240 | | 0.340 |
| δV_r | 102 | | 87 |
| W_λ | 0.330 | | 0.340 |

6 апреля 2010 г., отчетливо не расщеплена, но заметно уширена по сравнению данными, полученными 24 сентября 2010 г. (в спектре от 30 июля 2010 г. она отсутствует).

Таблица 3 содержит параметры профилей линий, представленных на рис. 5 и 6, их глубины R , ширины в крыльях (на $r = 0.99$) δV_r и эквивалентные ширины W_λ . В спектре от 6 апреля 2010 г. абсорбции мельче и шире в крыльях, чем в данных от 30 июля 2010 г. и 24 сентября 2010 г., причем эти различия сравнительно невелики у линий Fe II высокого возбуждения, а также у линий He I и S II, и заметно больше у низковозбужденных линий Fe II. Глубины Fe II 5506 Å, определенные по спектрам в указанные даты, практически одинаковы, а у Fe II 5363 Å и Fe II 5169 Å они различаются в 2.5 и 2.6 раза соответственно. Углубление линии Fe II 5363 Å в наблюдениях от 6 апреля 2010 г. к 24 сентября 2010 г. так компенсировалось сужением, что ее эквивалентная ширина вернулась к прежнему значению. Мы полагаем, что уширение и

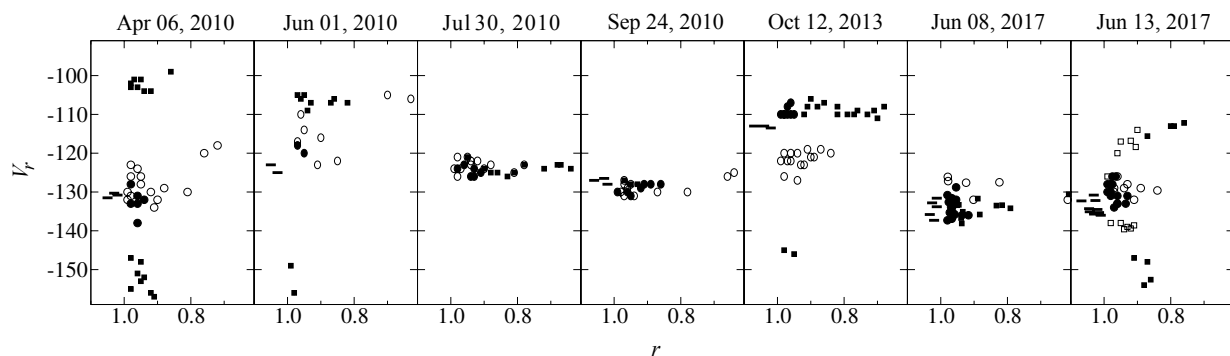


Рис. 4. Зависимости $V_r(r)$, определенные по всем полученным спектрам. Заполненные кружки — абсорбции Fe II высокого возбуждения, квадратики — абсорбции Fe II низкого возбуждения, колечки — He I, S II, горизонтальные черточки — эмиссии Fe II 6318, 6384, 6385 Å.

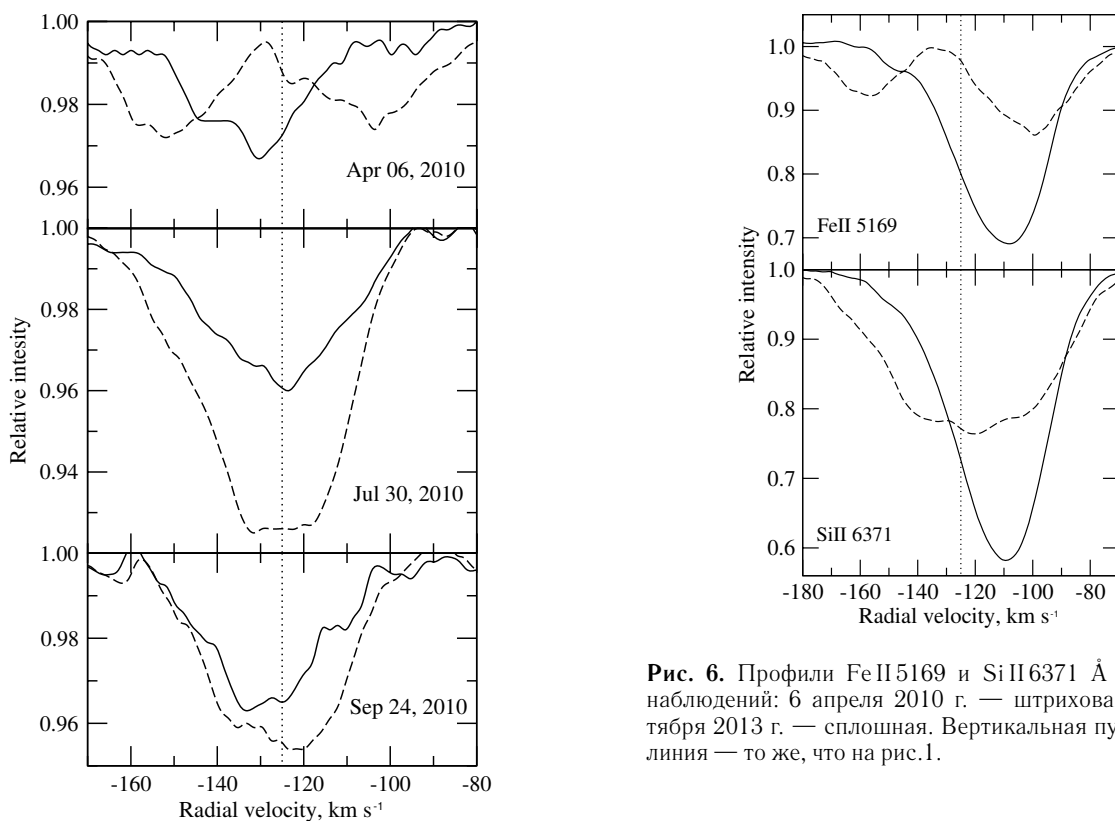


Рис. 5. Профили линий Fe II 5363 Å (3 eV, штриховая) и Fe II 5506 Å (10 eV, сплошная). Вертикальная пунктирная линия — то же, что на рис. 1.

раздвоение низковозмущенных линий Fe II связаны с особенностями поля скоростей в верхних слоях атмосферы, а не с появлением в них эмиссионных компонентов. В доступной нам области спектра V534 Луг последнее уверенно наблюдается только в линиях водорода. В отдельные моменты, как было отмечено выше, в спектре зарегистрированы слабые эмиссии Fe II 6318, 6384, 6385 Å. В

Рис. 6. Профили Fe II 5169 и Si II 6371 Å для двух наблюдений: 6 апреля 2010 г. — штриховая, 12 октября 2013 г. — сплошная. Вертикальная пунктирная линия — то же, что на рис. 1.

спектрах 2017 г. добавились эмиссии Fe II в более длинноволновой области: 7388, 7496, 7513 Å.

Перепад величин скорости невелик: вариации V_r от даты к дате составляют от 11 км с⁻¹ для He I и S II до 24 км с⁻¹ для абсорбции Fe II высокого возбуждения. Из данных, приведенных в таблицах и на рисунках с профилями линий, можно заключить, что радиальный градиент скорости в атмосфере V534 Луг был минимален, и она была наиболее стабильна 30 июля 2010 г., 24 сентября 2010 г. и 8 июня 2017 г.: дифференциальные сдвиги линий в эти даты близки к ошибкам измерений, ширины и аномалии формы их профилей минимальны. Предполагая, что средняя лучевая скорость в

эти даты была близка к скорости центра массы звезды, мы принимаем как первое приближение $V_{\text{sys}} \approx -125 \text{ км с}^{-1}$ ($V_{\text{lsr}} \approx -105 \text{ км с}^{-1}$). Эта оценка близка также к средним величинам скоростей в (5)–(7) колонках таблицы 2. Близкие величины средних значений и амплитуд приведены в работах [18] и [24], однако надо иметь в виду, что в этих работах скорости получены усреднением *по всем измеренным линиям*, без анализа их особенностей.

3.3. Светимость и удаленность звезды

Первая оценка двумерного спектрального класса V534 Lyr, сделанная В. Морганом: B9 Ib [33]. Бонсак и Гринстейн [18] изменили спектральный класс на A0 Iab, основываясь на том, что бальмеровская серия в спектре простирается до H₂₄, а линии H β и H γ имеют эмиссионные компоненты, и амплитуда изменения лучевой скорости выше типичной для сверхгигантов Ib. Последний аргумент усиливают обнаруженные нами значительные и переменные дифференциальные сдвиги линий, в частности, наблюдавшийся 12 октября 2013 г. бальмеровский прогресс (рост V_r от H α к H δ с -157 км с^{-1} до -133 км с^{-1}), и отмеченная авторами [18, 24] и наблюдавшаяся нами переменность интенсивностей и положений эмиссионных деталей профилей линий H I. Как видно на рис. 1, в спектрах 2000 и 2010 г. эмиссия H α двухпиковая, и интенсивность красного пика всегда выше синего. Однако в июне 2017 г. H α имеет профиль типа P Cyg, который через пару месяцев приобретает характер двухпиковой эмиссии. Переменность профиля H β аналогична: как иллюстрирует рис. 2, ее эмиссионный компонент переходит с красного крыла на синее. По результатам наблюдений от 8 июня 2017 г. профиль H β имеет тип P Cyg с мощной и сдвинутой в коротковолновую область абсорбцией, которая раздваивается в спектре, полученном спустя несколько дней, 13 июня 2017 г.

Спектральный класс A0 Iab соответствует расстоянию до V534 Lyr, $d = 5.7$ кпк [18]. Профили межзвездных линий Na I(1) и Ca II(1) в спектре звезды также говорят о ее большой удаленности. Присутствие в них компонентов с $V_r = -46 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 7) с учетом данных работы Бранда и Блитца [34] указывает на $d > 7$ кпк. Большую удаленность звезды мог бы подтвердить ее параллакс, $\pi = 0.379 \text{ mas}$, измеренный GAIA, однако в каталоге DR1 он отягощен большой ошибкой $\pm 0.378 \text{ mas}$. Заметное собственное движение $3''6 \pm 0''8$ в каталоге [35] при $d \approx 6$ кпк соответствует скорости 103 км с^{-1} , направленной к плоскости Галактики. В сочетании

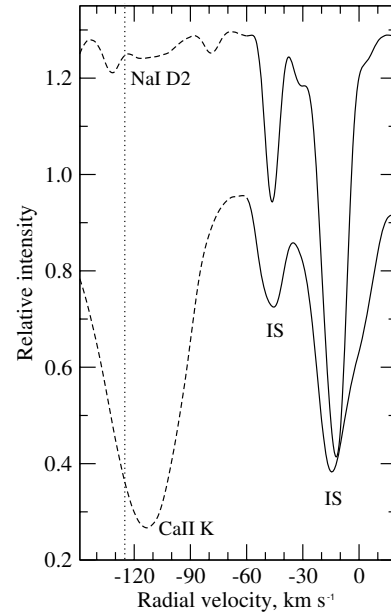


Рис. 7. Звездная (штриховая линия) и межзвездная части профилей линий Na I D2 и Ca II K по спектру, полученному 12 октября 2013 г. Вертикальная пунктирная линия — как на рис. 1.

с $V_{\text{lsr}} \approx -105 \text{ км с}^{-1}$ это дает пространственную скорость около 140 км с^{-1} .

Наличие межзвездных компонентов у линий Na I(1) и Ca II(1) заставило нас предпринять поиск возможных DIBs. Луна и др. [36] в своем исследовании межзвездного и околозвездного поглощения для выборки post-AGB-звезд обнаружили в спектре V534 Lyr две такие детали (5780 и 5797 Å). Однако в их измерениях положений DIBs получен большой разброс. В наших спектрах нет деталей, которые можно было бы надежно отождествить с известными DIBs. Единственная деталь, которую можно отождествить с наиболее сильной из известных полос 5780 Å, в спектре V534 Lyr очень слаба — ее глубина лишь около 0.015.

Полученная оценка расстояния $d \approx 6$ кпк для высокоширотной звезды с видимой звездной величиной $V = 8^{\text{m}}58$ [21] приводит нас к значению ее абсолютной величины: $M_V \approx -5^{\text{m}}3$, которая, согласно данным [37], соответствует спектральному классу V534 Lyr. Викерс и др. [38], моделируя распределение энергии в спектре звезды, получили расстояние $d \approx 3.19 \pm 0.43$ кпк. Эта уменьшенная оценка расстояния ведет к понижению абсолютной величины, $M_V \approx -3^{\text{m}}94$, и ухудшит соответствие спектрального класса и светимости.

Светимость звезды можно оценить по эквивалентной ширине ИК-триплета кислорода O I 7773 Å в спектре V534 Lyr: $W_\lambda = 1.99 \text{ Å}$. Используя калибровку [39, 40], получаем очень

высокую светимость $M_V \approx -8^m$. Однако эта оценка отягощена значительными погрешностями, поскольку обе калибровки получены авторами [39, 40] для сверхгигантов I типа населения. Исследуемая нами звезда V534 Lyr, очевидно, не относится к массивным сверхгигантам. Кроме того, оценку ее светимости искажает также и специфический химический состав атмосферы, прежде всего — аномальное содержание кислорода.

3.4. Определение параметров модели атмосферы и расчет химического состава

Для определения основных параметров модели: эффективной температуры T_{eff} и ускорения силы тяжести $\lg g$, мы использовали свою стандартную методику [41], которая успешно применялась в исследованиях спектров звезд различных типов. Параметры T_{eff} и $\lg g$ были определены, исходя из требования соблюдения ионизационного баланса, т.е. равенства содержания железа, рассчитанного по линиям Fe I и Fe II. Микротурбулентная скорость ξ_t найдена также стандартным способом из условия отсутствия зависимости содержаний железа $\lg \epsilon(\text{Fe I}, \text{Fe II})$, определенных по набору линий, от их эквивалентных ширин W_λ . Для учета возможных изменений параметры T_{eff} и $\lg g$ были определены для каждого имеющегося момента наблюдений. Полученные индивидуальные значения температуры T_{eff} , приведенные в колонке (4) таблицы 2, отличаются друг от друга незначительно. Их различия находятся в пределах ошибок определения этого параметра, поэтому для расчета содержаний химических элементов мы использовали среднее значение $T_{\text{eff}} = 10\,000$ К. Эта оценка отлично согласуется с предыдущим определением T_{eff} в работе [24], что является дополнительным указанием на постоянство температуры звезды. Отметим, что ранее в работе [19] для определения температуры V534 Lyr было принято условие солнечного содержания гелия в ее атмосфере, что привело к более высокому значению $T_{\text{eff}} = 11\,500$ К.

Контроль отождествления деталей в спектре V534 Lyr мы выполняли с привлечением атласа [42] со спектрами высокого разрешения A-сверхгигантов. Содержания химических элементов в атмосфере исследуемой звезды рассчитаны по эквивалентным ширинам линий в приближении ЛТР. Расчет модели атмосферы, содержаний химических элементов и расчет синтетических спектров выполнены с использованием программы WIDTH9 на основе сетки моделей Куруца [43], адаптированной [44] к среде OS Linux. Значения потенциалов возбуждения и сил осцилляторов для всех линий, а также константы уширения взяты из базы данных атомных линий VALD [45].

Учитывая изложенные выше особенности спектра V534 Lyr, мы рассчитали химический состав по эквивалентным ширинам абсорбций, измеренным в спектре 8 июня 2017 г. В выборе наблюдательного материала мы руководствовались зарегистрированным диапазоном длин волн и отсутствием в спектре раздвоения абсорбций (рис. 4 и таблица 2). Для увеличения числа линий были частично привлечены данные об эквивалентных ширинах нераздвоенных линий из спектра 2013 г. Результаты расчета, выполненного с параметрами $T_{\text{eff}} = 10\,000$ К, $\lg g = 2.5$, $\xi_t = 4.0$, представлены в таблице 4, где указаны число использованных линий и среднеквадратичная ошибка определения содержания элементов. В последней колонке таблицы приведены относительные величины $[X/\text{Fe}]_\odot$, для расчета которых мы использовали сведения о содержаниях элементов в фотосфере Солнца согласно Асплунду и др. [46].

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наличие эмиссионно-абсорбционного профиля линии $\text{H}\alpha$, у которого положение эмиссионных компонентов и соотношение их интенсивностей меняется со временем, является признаком прохождения ударной волны в звездной атмосфере. Кроме того, мы видим малоамплитудную переменность значений лучевой скорости по линиям с высоким потенциалом возбуждения, которые формируются в глубоких слоях звездной атмосферы. Таким образом, нами зарегистрированы признаки пульсационной нестабильности звезды. В спектрах V534 Lyr мы обнаружили неизвестную ранее особенность: раздвоение профилей избранных абсорбций металлов в отдельные моменты наблюдений. Такого рода двоение линий металлов свидетельствует о пульсациях по типу звезд W Vir. Хорошим примером является поле скоростей в атмосфере самой W Vir [47]. Дополнительный аргумент, подтверждающий наличие пульсаций, дает нам анализ индивидуальных скоростей по расщепленным линиям в спектре от 13 июня 2017 г., в котором степень расщепления низковозбужденных абсорбций меняется в зависимости от глубины абсорбций. Это различие иллюстрируют данные в последней строке таблицы 2 и панель рис. 4 зависимостей $V_r(r)$, полученных 13 июня 2017 г.

Параметры модели атмосферы и содержания химических элементов в атмосфере V534 Lyr, определенные нами, мало отличаются от ранее опубликованных [24]. Здесь мы рассмотрим особенности химического состава лишь вкратце. Детальный анализ особенностей химического состава этой звезды затруднен по ряду причин: весьма ограниченный набор полученных содержаний химических

Таблица 4. Содержания химических элементов $\lg \epsilon$, рассчитанные с параметрами модели $T_{\text{eff}} = 10\,000$ K, $\lg g = 2.5$, $\xi_t = 4.0$. Указаны ошибка среднего σ , число использованных линий n и относительные содержания элементов $[X/Fe]_{\odot}$. Во втором столбце приведены содержания элементов в фотосфере Солнца [46]

| Элемент, ион | $\lg \epsilon_{\odot}$ [46] | V534 Lyr | | |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------|-----|------------------|
| | | $\lg \epsilon \pm \sigma$ | n | $[X/Fe]_{\odot}$ |
| He I | 10.32 | 11.31 ± 0.17 | 10 | +1.27 |
| C II | 8.70 | 8.70 ± 0.06 | 3 | +0.28 |
| N I | 7.83 | 8.65 ± 0.21 | 2 | +1.10 |
| N II | | 8.53 ± 0.10 | 3 | +0.98 |
| O I | 8.69 | 8.94 ± 0.04 | 18 | +0.53 |
| Ne I | 7.93 | 8.37 ± 0.08 | 6 | +0.72 |
| Mg I | 7.60 | 7.43 ± 0.08 | 5 | +0.11 |
| Mg II | | 7.13 ± 0.09 | 7 | -0.19 |
| Al II | 6.45 | 6.79 ± 0.08 | 2 | +0.52 |
| Si II | 7.51 | 7.53 ± 0.16 | 6 | +0.30 |
| P II | 5.41 | 6.13 ± 0.03 | 4 | +0.90 |
| S II | 7.12 | 7.72 ± 0.08 | 9 | +0.88 |
| Sc II | 3.15 | 3.14 ± 0.18 | 2 | +0.27 |
| Ti II | 4.95 | 4.61 ± 0.05 | 20 | -0.06 |
| V II | 3.93 | 3.66 ± 0.06 | 2 | +0.01 |
| Cr II | 5.64 | 5.14 ± 0.05 | 20 | -0.28 |
| Mn II | 5.43 | 5.69 ± 0.10 | 4 | +0.44 |
| Fe I | 7.50 | 7.23 ± 0.05 | 5 | +0.01 |
| Fe II | | 7.20 ± 0.04 | 66 | -0.02 |
| Ni II | 6.22 | 6.02 ± 0.15 | 5 | +0.08 |
| Sr II | 2.87 | 2.50 ± 0.01 | 2 | -0.09 |

элементов; применение стандартной модели атмосферы в случае звезды, атмосфера которой нестабильна и, вероятно, подвержена влиянию ударных волн. Возможен также вклад ошибки из-за неучета эффектов отклонения от локального термодинамического равновесия. Однако их влияние на оценку металличности для горячей звезды невелико [48].

Основные группы элементов, относительные содержания которых позволяют судить о стадии эволюции звезды и ее принадлежности к тому или иному населению Галактики, следующие: CNO-триада, группа железа (Cr, V, Fe, Ni),

легкие металлы α -процесса (Mg, Al, Si, P, S) и тяжелые металлы s -процесса. Содержание железа в атмосфере V534 Lyr слегка понижено: $[Fe/H]_{\odot} = -0.28$, что в сочетании с высокой лучевой скоростью $V_r \approx -125$ км с⁻¹ указывает на принадлежность звезды к толстому диску Галактики. Содержание металлов группы железа (Cr, V, Mn, Ni) незначительно отличается от содержания железа: $[Met/Fe]_{\odot} = +0.06$.

Для определения статуса далеко проэволюционировавшей звезды принципиальным в распространенности элементов является содержание элементов CNO-группы. Высокое содержание азота, $[N/Fe]_{\odot} = +1.10$, надежно определено нами по двум линиям NI низкой интенсивности. Избыток азота в атмосфере сверхгиганта может быть результатом первого перемешивания, при котором осуществляется вынос продуктов CN-цикла в ходе горения водорода в ядре. Большой избыток гелия, $[He/Fe]_{\odot} = +1.27$, является результатом последовательности ядерных реакций в звездном ядре и последующего перемешивания. Избыток кислорода у V534 Lyr иллюстрирует нижняя панель рис. 3, где сопоставлены фрагменты спектров V534 Lyr и α Cyg, содержащие линии кислорода O I 6155–6157 Å. Здесь также хорошо видим ослабление линий иона Fe II в спектре V534 Lyr по сравнению со спектром α Cyg. Содержания легких металлов (Mg, Al, Si, P, S), синтезируемых за счет α -процесса, усилены в атмосфере V534 Lyr в среднем на $[\alpha/Fe] = +0.4$. Усиление легких металлов согласуется с принадлежностью звезды к толстому диску Галактики, что подтверждается результатами исследования обширной выборки звезд близкой металличности в толстом диске [49].

По совокупности свойств аналогом V534 Lyr можно считать горячую звезду HD 105262, которая расположена в Галактике на высокой широте ($b = 72^{\circ}47'$) и имеет спектральный класс B9–A0. В базе данных SIMBAD эта звезда причислена к post-AGB-сверхгигантам. Ранее эта звезда, не имеющая ИК-избытка, рассматривалась как представитель более ранней стадии эволюции — горизонтальной ветви (далее — HB). Ключкова и Панчук [50] по фотографическим спектрам определили параметры $T_{\text{eff}} = 8500$ K, ускорение силы тяжести $\lg g = 1.5$, пониженную металличность $[Fe/H]_{\odot} = -1.2$ и детальный химический состав атмосферы. В недавней работе Гириджара и др. [51] получены те же параметры модели, но металличность существенно ниже: $[Fe/H]_{\odot} \approx -1.9$. Это различие можно объяснить более высоким спектральным разрешением спектров в работе [51]. Для проводимого сравнения

V534 Lyr и HD 105262 важным является большой избыток азота, обнаруженный и в атмосфере HD 105262 [51]. Обе звезды имеют низкую скорость вращения, $v \sin i = 6 \text{ км с}^{-1}$. Для HD 105262 скорость вращения измерена по спектрам высокого разрешения в работе [52]. Принадлежность к стадии НВ может объяснять отсутствие у V534 Lyr и HD 105262 околосредней пыли и обусловленного ею ИК-избытка.

Спектральные детали, схожие с особенностями спектра V534 Lyr, имеет также А-сверхгигант BD + 48°1220. На 6-м телескопе БТА в сочетании с эшелльным спектрографом в течение нескольких наблюдательных сезонов были получены оптические спектры высокого разрешения, на основании которых была обнаружена значительная переменность профилей линий H I и линий металлов [53]. Анализ этого спектрального материала методом моделей атмосфер с параметрами $T_{\text{eff}} = 7900 \text{ К}$, $\lg g = 0.0$, $\xi_t = 6.0$ показал, что металличность BD + 48°1220 близка к солнечной: $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -0.10$ [54], а химический состав ее атмосферы мало отличается от такового у V534 Lyr. Как и в случае V534 Lyr, был обнаружен большой избыток гелия, $[\text{He}/\text{H}] = +1.04$ и столь же значительный избыток кислорода $[\text{O}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.72 \text{ dex}$. При этом избыток углерода мал, $[\text{C}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.09$, и отношение $[\text{C}/\text{O}] < 1$. Содержания легких металлов изменены: $[\text{Na}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.87$ при $[\text{Mg}/\text{Fe}]_{\odot} = -0.31$. Но самое важное — в атмосфере BD + 48°1220 обнаружен большой избыток лития $[\text{Li}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.62$, что свидетельствует о выносе в атмосферу этого элемента, синтезированного на AGB-стадии. Кроме того, сделан вывод о вероятной эффективности механизма селективной сепарации химических элементов на пылинки оболочки. Полный набор имеющихся данных (светимость $M_v \approx -5^m$, скорость $V_{\text{sr}} \approx -20 \text{ км с}^{-1}$, пониженная металличность и особенности оптического спектра и химического состава) подтверждает статус O-rich post-AGB-звезды с исходной массой 4–9 M_{\odot} . Таким образом, звезда BD + 48°1220, имеющая ряд близких к V534 Lyr свойств, является сверхгигантом на более продвинутой стадии, после AGB.

Итак, мы видим, что наблюдаемые свойства V534 Lyr, за исключением ее высокой светимости и расположения вне плоскости Галактики, не дают оснований для классификации ее как post-AGB. Главное — V534 Lyr не имеет ИК-избытка и аномалий химического состава, ожидаемых для сверхгиганта post-AGB. Рассмотрим иные возможные варианты ее статуса. Отсутствие пылевой оболочки у звезды достаточно высокой светимости позволяет

рассмотреть ее как объект на стадии после красной ветви гигантов, находящийся на эволюционном этапе выше НВ. Источником энерговыделения у звезд на этой стадии, прошедших гелиевую вспышку в ядре, является горение гелия в ядре и водорода в слое. Большая потеря массы у этих сверхгигантов не ожидается. Для подтверждения такого статуса звезды можно опереться на удобную диаграмму $\lg g - T_{\text{eff}}$ (рис. 1 в статье [52]). Совокупность основных параметров V534 Lyr соответствует звездам НВ на диаграмме. Низкая скорость вращения $v \sin i = 5\text{--}6 \text{ км с}^{-1}$ также согласуется с предполагаемым статусом вблизи НВ: известно, что НВ-звезды вращаются медленно [48, 55]. Результаты, полученные нами в данной статье для V534 Lyr, — это еще одно подтверждение вывода [2, 56] о неоднородности выборки кандидатов в PPN.

Сочетание наблюдаемых особенностей V534 Lyr: наличие пульсаций в глубоких слоях атмосферы, пониженная металличность, тип и переменность эмиссионно-абсорбционного профиля $\text{H}\alpha$ — позволяет предположить, что звезда относится к пульсирующим звездам II типа населения, которые находятся в полосе нестабильности выше НВ и эволюционируют к AGB. В зависимости от массы, а следовательно, и от периода пульсаций, это может быть звезда типа BL Her или W Vir. Прямым указанием на статус пульсирующей звезды служат особенности оптического спектра: двухпиковые эмиссии и переменные во времени профили линий $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$ (рис. 1 и 2), наличие в отдельные моменты наблюдений раздвоения абсорбций (рис. 5) и наличие градиента скорости в атмосфере, зарегистрированное 13 июня 2017 г., что хорошо видно на рис. 4.

Здесь полезно обратить внимание на исследование химического состава выборки из 19 переменных звезд II типа населения [57], основанного на спектроскопии высокого разрешения. В указанной работе для расчетов содержаний химических элементов использовались только те спектры, в которых отсутствовали признаки расщепления (или асимметрии) абсорбций или эмиссии в линиях серии Бальмера. Авторы [57] сделали вывод о принципиальном различии химического состава звезд типа BL Her или W Vir: в атмосферах звезд типа BL Her содержание Na выше, чем у звезд W Vir. Этот вывод дает нам основание отнести исследуемую звезду V534 Lyr скорее к виргинидам: в спектрах V534 Lyr нам не удалось обнаружить ни одну из линий Na I, ожидаемых в случае избытка этого элемента в атмосфере.

Типичными представителями звезд типа W Vir являются члены шаровых скоплений. Примером может служить виргинида V1 (K 307) в составе шарового скопления M 12. Авторы [58] определили ее

фундаментальные параметры ($T_{\text{eff}} = 5600$ К, $\lg g = 1.3$) и металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.27$, согласующаяся с металличностью других членов М 12. В атмосфере этой виргиниды выявлены измененные содержания CNO-элементов, причем азот имеет избыток: $[\text{N}/\text{Fe}] = +1.15$ dex. Относительные содержания Na и элементов α -процесса Mg, Al, Si, Ca и Ti в различной степени также усилены. Основной особенностью спектра K 307 является наличие сложных абсорбционно-эмиссионных профилей линий $\text{H}\beta$ и $\text{H}\alpha$ (см. рис. 2 в [58]), подобных профилям в спектре V534 Lyr.

Основные кинематические и химические параметры для обширной выборки звезд HB в толстом диске рассмотрены Кинманом и др. [59]. Наше предположение о том, что V534 Lyr может быть звездой толстого диска на стадии выше HB (post-HB) подтверждается большой пространственной скоростью исследуемой звезды, отсутствием пылевой околозвездной оболочки и специфическим химическим составом атмосферы. Усложняющим фактором для фиксации статуса звезды служит то, что выше HB могут наблюдаться звезды нескольких стадий эволюции: это могут быть достаточно молодые звезды, эволюционирующие к RGB, а также более продвинутые в эволюции звезды после RGB или же перед AGB.

Критичным для более определенных выводов является ответ на вопрос о возможной двойственности V534 Lyr. Изменения V_r со временем, вероятно, вызваны пульсациями, но пока не исключена и спектральная двойственность в варианте SB 1. Указанием на возможную двойственность звезды можно считать найденную переменность скорости по эмиссиям Fe II (2). Здесь отметим результаты Шахина и Джеффри [60], которые, проанализировав переменность фотометрических данных для V534 Lyr, не нашли явного периода и предположили, что изменения могут быть короткопериодическими. Надежные фотометрические и спектральные данные, требующиеся для изучения и определения параметров переменности блеска и спектра, в настоящее время отсутствуют. Поэтому крайне необходимо провести долговременный и детальный мониторинг V534 Lyr для окончательных выводов о природе ее переменности.

5. ВЫВОДЫ

На основании наблюдений на 6-м телескопе с эшелльным спектрографом НЭС ($R = 60\,000$) детально изучены особенности оптического спектра V534 Lyr — высокоширотной звезды с неопределенным статусом. Для всех дат наблюдений измерены гелиоцентрические лучевые скорости V_r , соответствующие положению всех компонентов абсорбций металлов, а также D-линий Na I и $\text{H}\alpha$.

Анализ поля скоростей по линиям различной природы выявил малоамплитудную переменность V_r по линиям с высоким потенциалом возбуждения, которые формируются в глубоких слоях звездной атмосферы, и позволил оценить системную скорость $V_{\text{sys}} \approx -125$ км с⁻¹ ($V_{\text{lsr}} \approx -105$ км с⁻¹). Сделанная оценка расстояния $d \approx 6$ кпк для высокоширотной звезды приводит к значению абсолютной величины $M_V \approx -5.3^m$, что согласуется со спектральной классификацией V534 Lyr.

Нами обнаружен неизвестный для этой звезды ранее спектральный феномен: раздвоение профилей избранных абсорбций металлов в отдельные моменты наблюдений. Для всех моментов, когда раздвоение присутствует в спектре, оно достигает больших значений: $\Delta V_r = 20\text{--}50$ км с⁻¹.

Спектральный класс звезды близок к A0 Ib, а эффективная температура $T_{\text{eff}} \approx 10\,500$ К. Металличность, надежно определенная по линиям металлов группы железа (Cr, V, Mn, Ni), незначительно отличается от содержания этого элемента: $[\text{Met}/\text{Fe}] = +0.06$. Избыток азота и гелия свидетельствует о продвинутой эволюционной стадии звезды. Пониженное содержание металлов группы железа в сочетании с высокой лучевой скоростью указывает на принадлежность звезды к толстому диску Галактики.

Совокупность наблюдаемых особенностей V534 Lyr: наличие вероятных пульсаций в глубоких слоях атмосферы, регистрируемое в отдельные моменты наблюдений раздвоение профилей абсорбций металлов с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня, пониженная металличность, тип и переменность эмиссионно-абсорбционного профиля $\text{H}\alpha$ и $\text{H}\beta$ — позволяет отнести звезду к пульсирующим звездам II типа населения, которые находятся в полосе нестабильности вблизи HB. В целом можно сделать вывод о полном несоответствии зарегистрированных нами свойств V534 Lyr стадии post-AGB, к которой звезду относили в ранее опубликованных статьях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №14-50-00043, направление «Магнитометрия звезд»). Е.Г.С. благодарит Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку (проект 16-02-00587а). В работе использованы базы астрономических данных SIMBAD и SAO/NASA ADS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Herwig, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43**, 435 (2005).
2. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 279 (2014).
3. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **60**, 344 (2016).
4. V. G. Klochkova, *ASP Conf. Ser.* **510**, 121 (2017).
5. V. G. Klochkova, R. Szczerba, V. E. Panchuk, and K. Volk, *Astron. and Astrophys.* **345**, 905 (1999).
6. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 88 (2000).
7. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 439 (2000).
8. V. G. Klochkova and T. Kipper, *Baltic Astronomy* **15**, 395 (2006).
9. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **63**, 112 (2008).
10. H. Van Winckel and M. Reyniers, *Astron. and Astrophys.* **354**, 135 (2000).
11. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavolzhanskaya, *Astronomy Letters* **42**, 815 (2016).
12. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., arXiv:1711.11251 (2017).
13. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **292**, 19 (1997).
14. R. D. Oudmaijer, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 541 (1998).
15. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, A. S. Miroshnichenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 4183 (2016).
16. T. Şahin, D. L. Lambert, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **461**, 4071 (2016).
17. N. R. Trams, L. B. F. M. Waters, H. J. G. L. M. Lamers, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **87**, 361 (1991).
18. W. K. Bonsack and J. L. Greenstein, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **68**, 249 (1956).
19. A. Arellano Ferro, S. Giridhar, and P. Mathias, *Astron. and Astrophys.* **368**, 250 (2001).
20. F. Rufener, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **26**, 275 (1976).
21. J. D. Fernie, *Astrophys. J. Suppl.* **52**, 7 (1983).
22. B. Hauck and M. Mermilliod, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 431 (1998).
23. W. E. C. J. van der Veen, L. B. F. M. Waters, N. R. Trams, and H. E. Matthews, *Astron. and Astrophys.* **285**, 551 (1994).
24. S. Giridhar and A. Arellano Ferro, *Astron. and Astrophys.* **443**, 297 (2005).
25. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61**, 820 (2017).
26. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1997).
27. V. Panchuk, M. Yushkin, V. Klochkova, and M. Sachkov, *Proc. SPIE*, **9908**, 99086Y (2016).
28. M. V. Yushkin and V. G. Klochkova, Preprint № 206, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs. of RAS, Nizhnij Arkhyz, 2005).
29. G. A. Galazutdinov, Preprint № 92, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs. of RAS, Nizhnij Arkhyz, 1996).
30. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and D. S. Nasonov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 386 (2008).
31. E. L. Chentsov and E. S. Gorda, *Astronomy Letters* **30**, 461 (2004).
32. T. Kinman, F. Castelli, C. Cacciari, et al., *Astron. and Astrophys.* **364**, 102 (2000).
33. W. W. Morgan and N. G. Roman, *Astrophys. J.* **112**, 362 (1950).
34. J. Brand and L. Blitz, *Astron. and Astrophys.* **275**, 67 (1993).
35. F. van Leeuwen, *Astron. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
36. R. Luna, N. L. J. Cox, M. A. Satorre, et al., *Astron. and Astrophys.* **480**, 133 (2008).
37. V. Straižys and G. Kuriliene, *Astrophys. and Space Sci.* **80**, 353 (1981).
38. S. B. Vickers, D. J. Frew, Q. A. Parker, and I. S. Bojčić, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, 1673 (2015).
39. A. Arellano Ferro, S. Giridhar, and E. Rojo Arellano, *Revista Mexicana Astronom. Astrofís.* **39**, 3 (2003).
40. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **46**, 139 (2002).
41. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and V. V. Tsymbal, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **19**, 19 (1985).
42. V. G. Klochkova, E. G. Sendzikas, and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 99 (2015).
43. R. Kurucz, CD-ROM № 13 (Smithsonian Astrophys. Obs., Cambridge, 1993).
44. V. Tsymbal, *ASP Conf. Ser.* **108**, 198 (1996).
45. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **112**, 525 (1995).
46. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 481 (2009).
47. V. V. Kovtyukh, G. Wallerstein, S. M. Andrievsky, et al., *Astron. and Astrophys.* **526**, A116 (2011).
48. J. G. Cohen and J. K. McCarthy, *Astron. J.* **113**, 1353 (1997).
49. B. E. Reddy, D. L. Lambert, and C. Allende Prieto, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **367**, 1329 (2006).
50. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astrofiz. Issled. (Izvestiya SAO)* **26**, 23 (1988).
51. S. Giridhar, R. Molina, A. A. Ferro, and G. Selvakumar, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **406**, 290 (2010).
52. J. C. Martin, *Astron. J.* **128**, 2474 (2004).
53. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, *Inform. Bull. Var. Stars* № 5584 (2004).
54. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavolzhanskaya, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **51**, 642 (2007).
55. R. C. Peterson, *Astrophys. J.* **275**, 737 (1983).
56. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **67**, 385 (2012).
57. T. Maas, S. Giridhar, and D. L. Lambert, *Astrophys. J.* **666**, 378 (2007).

58. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, N. S. Tavganskaya, and V. V. Kovtyukh, *Astronomy Letters* **29**, 748 (2003).
59. T. D. Kinman, H. L. Morrison, and W. R. Brown, *Astron. J.* **137**, 3198 (2009).
60. T. Şahin and C. S. Jeffery, *Astronomische Nachrichten* **328**, 848 (2007).

On the Evolutionary State of High-Latitude Variable V534 Lyr

V. G. Klochkova, E. G. Sendzikas, and E. L. Chentsov

Based on the high spectral resolution monitoring conducted at the 6-m BTA telescope, we study the optical spectrum of the high-latitude variable V534 Lyr. Heliocentric radial velocities V_r , corresponding to the positions of all metal absorption components, as well as the Na I and H α D lines were measured during all the observational sets. The analysis of the velocity field examining the lines of various nature revealed a low-amplitude variability of V_r based on the lines with a high excitation potential, which are formed in deep layers of the stellar atmosphere, and allowed to estimate the systemic velocity of $V_{\text{sys}} \approx -125 \text{ km s}^{-1}$ ($V_{\text{lsr}} \approx -105 \text{ km s}^{-1}$). The distance estimate of $d \approx 6 \text{ kpc}$ for the star leads to its absolute magnitude of $M_V \approx -5^m3$, what corresponds to the spectral classification. The previously undetected spectral phenomenon was revealed for this star: at certain times a splitting of the profiles of low-excited absorptions is observed, reaching $\Delta V_r = 20\text{--}50 \text{ km s}^{-1}$. A combination of the parameters: reduced metallicity $[\text{Met}/\text{H}]_{\odot} = -0.28$, high nitrogen abundance $[\text{N}/\text{Fe}] = +1.10$, large spatial velocity, high luminosity, a strong variability of the emission-absorption profiles of H I lines, splitting of metal absorptions at different times of observations and the variability of the velocity field in the atmosphere allow to classify V534 Lyr as a pulsating star in the thick disk of our Galaxy.

Keywords: *supergiants—stars: individual: V534 Lyr*