

УДК 524.31.01:520.84

## СПЕКТРОСКОПИЯ СВЕРХГИГАНТОВ С ИЗБЫТКАМИ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ 1998–2018 ГГ.

© 2019 В. Г. Клочкова\*

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 12 ноября 2018 года; после доработки 18 марта 2019 года; принята к публикации 18 марта 2019 года

Кратко суммированы результаты, полученные в ходе второго этапа (1998–2018 гг.) выполнения на 6-м телескопе БТА программы детальной спектроскопии пекулярных сверхгигантов, отождествляемых с галактическими ИК-источниками. Основным аспектом программы является поиск эволюционных изменений химического состава звезд, прошедших стадию AGB и третье перемешивание, а также анализ спектральных проявлений кинематических процессов в их протяженных, зачастую нестабильных, атмосферах и в оболочках. Наиболее значительным результатом является обнаружение избытков элементов *s*-процесса у семи одиночных post-AGB-звезд, что эмпирически подтверждает теорию эволюции звезд данного типа. У трех из этих звезд впервые обнаружен вынос тяжелых металлов *s*-процесса в околозвездные оболочки. Избытки лития обнаружены в атмосферах пекулярных сверхгигантов V2324 Cyg и V4334 Sgt. Результаты исследования кинематики атмосфер и оболочек послужат уточнению баланса вещества, производимого звездами на стадиях AGB и post-AGB и поставляемого в межзвездную среду (ISM).

Ключевые слова: *звезды – эволюция – сверхгиганты – протяженные атмосферы – околозвездные оболочки – нуклеосинтез*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследуемые нами пекулярные сверхгиганты с большими избытками ИК-потока относятся преимущественно к эволюционной стадии «после асимптотической ветви гигантов», далее post-AGB. Результаты исследования выборки сверхгигантов, полученные на первом этапе спектроскопических наблюдений на 6-м телескопе, даны в обзоре [1]. Здесь мы дополним этот обзор, представляя основные результаты, полученные и опубликованные в 1998–2018 гг. Вкратце напомним основные признаки post-AGB-звезд, называемых также протопланетарными туманностями (PPN), затем приведем обоснование актуальности детального изучения этих объектов и опишем основные результаты, полученные по программе в предыдущее десятилетие. На стадии PPN наблюдаются далеко проэволюционировавшие звезды малых и промежуточных масс, с исходными массами на главной последовательности (далее в тексте — ГП) менее 8–9  $M_{\odot}$ . На предшествующей стадии эволюции, асимптотической ветви гигантов (AGB), эти звезды наблюдаются в виде холодных (их эффективная температура  $T_{\text{eff}} \approx 3000$  K) красных сверхгигантов. AGB-стадия, будучи существенно короче предыдущих этапов эволюции, очень важна

из-за большой потери массы и формирования околозвездной оболочки [2]. Отметим также, что именно в этом интервале масс вблизи ГП около 10% звезд обладают большими магнитными полями. Методом измерения круговой поляризации в линиях мазеров магнитные поля обнаружены и у ряда их далеко проэволюционировавших потомков — PPN и PN [3, 4].

После истощения гелия в ядре AGB-звезды образуется вырожденное C-O-ядро, окруженное альтернативными энергетически активными слоями горения гелия и водорода. Большую часть времени энерговыделение обеспечивает водородный слой, а прилегающий к вырожденному C-O-ядру гелиевый слой при этом остается инертным (детали и ссылки см. в обзоре [5]). Между этими основными энерговыделяющими слоями образуется тонкий слой, так называемый «He-intershell», в котором по мере его сжатия и роста температуры происходит возгорание гелия и накопление углерода, что создает условия для важнейшей реакции  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ . Эта реакция является основным источником нейтронов, обеспечивающих последующий синтез ядер тяжелых металлов (детальное описание этих процессов и необходимые ссылки доступны в статьях [6, 7]). Дополнительное энерговыделение в «He-intershell» изменяет конфигурацию внутреннего строения звезды и при-

\*E-mail: valenta@sao.ru

водит к неустойчивости и развитию эффективного конвективного перемешивания вещества слоев. За счет проникающей конвекции в атмосферу звезды выносятся вещества, переработанное в ядерных реакциях, сопровождающих указанные процессы энерговыделения [8]. Вынос вещества, обусловленный многократно повторяющимся чередованием тонких, энергетически активных слоев горения водорода и гелия, принято называть третьим перемешиванием.

Первичный газ в ранней Вселенной представлял собой смесь водорода и гелия с примесью легких элементов (Li, Be, B). Позже, в ходе эволюции и взрывов массивных звезд первого поколения, началось формирование ядер более тяжелых химических элементов (C, O, Ne, Mg, Si и Fe). Все разнообразие содержаний химических элементов, наблюдаемое нами ныне, возникло за счет наслоения результатов синтеза ядер в процессе эволюции нескольких звездных популяций. Повышенный интерес к AGB-звездам объясняется тем, что именно в недрах этих звезд, находящихся на кратковременной (характерное время  $10^3$  лет) эволюционной стадии, создаются физические условия для синтеза ядер тяжелых металлов и для выноса наработанных продуктов ядерных реакций в звездную атмосферу. Расчеты показывают, что AGB-звезды являются основным поставщиком тяжелых металлов (свыше 50% всех элементов тяжелее железа) в межзвездную среду, причем более эффективными поставщиками являются AGB-звезды с исходными массами ниже  $3M_{\odot}$ . Синтез ядер тяжелых металлов осуществляется за счет так называемого *s*-процесса, суть которого состоит в медленной (по сравнению с  $\beta$ -распадом) нейтронизации ядер [9]. Затравочными ядрами для цепочки реакций *s*-процесса служат ядра Fe. У звезд с исходной массой ниже  $3M_{\odot}$  необходимый 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  $^{22}\text{Ne}$ . Эти более массивные AGB-звезды могут быть также источниками лития. Описание эволюции звезд вблизи AGB и результаты современных расчетов синтеза и выноса элементов приведены в статьях [10, 11].

Вещество AGB-звезды теряется за счет двух процессов: во-первых, наработанные в ходе нуклеосинтеза углерод и кислород присоединяются к вырожденному C–O-ядру (что изменяет характер энерговыделения), во-вторых, вещество теряется за счет ветра с поверхности звезды. В результате AGB-звезда теряет от 50% до 85% своей исходной массы [10]. Вследствие сброса вещества вокруг звезды образуется оптически толстая оболочка, и звезда становится трудно наблюдаемой в оптическом диапазоне. В какой-то момент жизни

AGB-звезды внезапно ее темп потери массы резко возрастает. Одной из причин резкого возрастания темпа потери вещества может быть пульсационная нестабильность сверхгигантов, присущая, согласно [12], звездам на этой стадии эволюции в достаточно широком интервале фундаментальных параметров. Два физических явления: синтез тяжелых металлов и пульсационная активность, свойственные звездам на стадиях AGB и после нее, — определяют основной интерес к этим объектам.

Сложность теоретического изучения звездного нуклеосинтеза вызвана тем, что эффективность синтеза и выноса свежих ядер на поверхность звезды зависит от большого числа факторов: исходной массы звезды на ГП, ее металличности, параметров истечения вещества, деталей процесса нуклеосинтеза и неопределенностей численного описания процесса перемешивания. Поэтому, помимо классической проблемы исследования химического состава звезд на нетривиальных стадиях эволюции, отдельный интерес представляет и возможность изучения процессов обмена веществом между звездной атмосферой и околозвездной пылевой оболочкой, а также поиск механизмов, объясняющих peculiarity химического состава атмосфер звезд, окруженных пылевыми оболочками. Принято считать, что в условиях газопылевой оболочки могут быть достаточно эффективными процессы селективной конденсации ядер металлов на пылинки. По мере формирования пылевых частиц из газовой составляющей преимущественно уходят элементы с высокой температурой конденсации. В частности, этот селективный процесс искажает картину третьего перемешивания, увеличивая отношение C/O, C/Fe, N/Fe, O/Fe и понижая отношение s/Fe. Основным аргумент, подтверждающий работу механизма селективной конденсации ядер металлов на пылинки — это зависимость содержания химических элементов от температуры конденсации на пылинки [13].

Содержание Fe, Mg, Si, Ca в атмосферах таких звезд понижено на несколько порядков, в то время как CNO, S и даже элемент группы железа Zn имеют солнечные содержания. Стоит подчеркнуть, что эта картина аналогична поведению содержаний химических элементов в газовой компоненте ISM. Очевидно, что атмосфера звезды должна быть достаточно стабильной, чтобы перемешивание или звездный ветер не замывали картину распределения химических элементов. Однако есть свидетельства, что атмосферы post-AGB-звезд нестабильны: для большинства этих объектов отмечаются пульсации, истечение вещества, что проявляется в наличии переменной эмиссии, преимущественно в линиях водорода. Эффективность процесса

селективной конденсации, ее зависимость от эффективной температуры и металличности звезды иллюстрируют данные в статье [14].

Теоретическое изучение эволюции звезд вблизи AGB затруднено из-за сложности этой системы, включающей по крайней мере два компонента: продолжающую свою эволюцию центральную звезду и остывающую оболочку, которая может иметь достаточно сложную структуру. Много неясностей остается в понимании звездного ветра, процессов конвекции, и, следовательно, выноса вещества. Однако в целом сформировалось представление о том, что, наряду с исходной массой звезды, темп потери массы в ходе ее эволюции является важнейшим параметром и определяет не только окончательную массу после фазы AGB, но и внутреннюю структуру звезды и характерные времена эволюции на заключительных фазах, а также изменения химического состава звездной атмосферы.

Инфракрасный телескоп спутника IRAS выполнил обзор около 95% всей небесной сферы. Одним из результатов этого ИК-обзора явилось выделение на высоких широтах Галактики источников, представляющих собой околозвездные оболочки с температурами от 200 до 1000 К. Впоследствии часть этих объектов была отождествлена со звездами высокой светимости предположительно на эволюционных стадиях AGB и post-AGB. Небольшая часть выделенных объектов доступна для спектроскопических наблюдений в оптическом диапазоне с высоким спектральным разрешением, что обеспечивает эмпирическую базу в исследованиях звездного нуклеосинтеза. После выделения нового типа далеко проэволюционировавших звезд с большими избытками ИК-потока на нескольких крупных телескопах мира были начаты программы спектроскопии звезд-кандидатов на стадиях post-AGB и AGB с целью изучения особенностей аномальных спектров, кинематического состояния истекающих атмосфер и протяженных околозвездных оболочек и, прежде всего, с целью изучения процесса звездного нуклеосинтеза и выноса его продуктов в звездную атмосферу.

## 2. СПЕКТРОСКОПИЯ POST-AGB-КАНДИДАТОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ 1998–2018 ГГ.

Такого рода наблюдательная программа под руководством автора данной статьи выполняется и на 6-м телескопе БТА в сочетании с современными эшелельными спектрографами. В ходе многолетних наблюдений (спектроскопия каждого из объектов проводилась неоднократно) мы получили и опубликовали несколько принципиально новых результатов. Химический состав изучен примерно у двадцати сверхгигантов с ИК-избытками, находящихся

преимущественно в галактическом поле. Подробнее см. обзор Ключковой [1]. Начиная с 1998 г. наблюдения проводятся на эшелельном спектрографе НЭС [15, 16] в сочетании с ПЗС-матрицами формата  $1 \times 1$ , с 2000 г. —  $2K \times 2K$ , с 2011 г. —  $2K \times 4K$ . В результате получена коллекция высококачественных спектров, которые предназначались в первую очередь для поиска аномалий химического состава, обусловленных ядерным синтезом химических элементов в недрах звезд малых и средних масс и последующим выносом продуктов синтеза в звездные атмосферы. Этот наблюдательный материал используется и для поиска пекулярностей спектров post-AGB-кандидатов, анализа поля скоростей в атмосферах и оболочках звезд с истечением массы, а также поиска ожидаемой долговременной переменности спектральных деталей. Для снижения потерь на входной щели спектрографа наблюдения выполняются с резателем изображения, поэтому каждый эшелельный порядок повторяется трижды.

В целом на основании изученной выборки кандидатов в PPN с привлечением опубликованных результатов других авторов можно говорить о неоднородности химического состава выборки. Избыток элементов *s*-процесса, ожидаемый для звезд на стадии post-AGB как следствие предшествующей эволюции звезды и процесса третьего перемешивания, обнаруживается пока крайне редко. К примеру, мы выявили избыток углерода и элементов *s*-процесса в атмосфере первой же изученной нами post-AGB-звезды CYCMI (IRAS 07134+1005) [17]. В то же время у родственного объекта V887 Her (IRAS 18095+2704) избыток элементов *s*-процесса не найден [17]. К настоящему времени достоверный избыток элементов *s*-процесса обнаружен только для одиннадцати post-AGB-звезд, семь из них исследованы по спектрам БТА: IRAS 04296+3429 [18], IRAS 07134+1005 [17], IRAS 20000+3239 [19], IRAS 22272+5435 [20], IRAS 23304+6147 [21], RAFGL2688 [22], а также виргинида VI K307 [23] в шаровом скоплении M 12. Кроме того, выводы об избытке тяжелых металлов опубликованы для следующих кандидатов в PPN: HD 158616 [24], HD 187885 [24], IRAS 22223+4327 [25], IRAS 02229+6208 [26] и IRAS 05341+0852 [25]. В спектре безымянной слабой в оптическом диапазоне post-AGB-звезды с эмиссией на  $21 \mu$ , отождествляемой с ИК-источником IRAS 20000+3239, обнаружены сверхизбытки тяжелых элементов [19]. К примеру, концентрация ядер лантана на порядок увеличена по отношению к металличности звезды. В связи с этим линия La II настолько сильна, что ее интенсивность сопоставима с интенсивностью линии H $\alpha$ .

Подчеркнем, что все эти выделенные по химическому составу и наличию полосы на  $21 \mu$  звезды являются одиночными объектами, что подтвердили авторы [27]. В настоящее время известно 27 звезд с эмиссией на  $21 \mu$ , причем все они принадлежат только post-AGB-стадии [28]. Присутствие детали на  $21 \mu$  в спектрах post-AGB-звезд с оболочками, обогащенными углеродом, позволяет в качестве основного агента предполагать какую-то сложную молекулу, содержащую атомы углерода. Были предложены, однако, и иные, но не подтвердившиеся, варианты отождествления детали на  $21 \mu$ . К примеру, в качестве агентов рассматривались наночастицы оксида железа FeO [29], способные при нагревании давать излучение на длине волны  $21 \mu$ , и карбид титана TiC [30].

На основе первых же фактов обнаружения избытков тяжелых металлов в работах Клочковой [1], Десин и др. [31] был сделан вывод о взаимосвязи присутствия эмиссии на  $21 \mu$  в ИК-спектрах звезд на стадии post-AGB и проявлений избытка тяжелых металлов в их атмосферах. Наши результаты, полученные для AFGL 2688, усилили этот вывод, поскольку для этого объекта характерны и слабый избыток элементов  $s$ -процесса, и практически не выделяемая на фоне монотонно возрастающего ИК-континуума полоса  $21 \mu$ . До настоящего времени этот результат остается одним из наиболее весомых (но не объясненных) в картине проявлений звездного нуклеосинтеза на стадиях AGB и post-AGB. Ван Винкель и Рейнерс [24] предприняли повторное исследование всех шести известных к тому времени звезд с деталью  $21 \mu$  и на однородном спектральном материале подтвердили вывод об эффективности  $s$ -процесса для этой группы объектов. В частности, эти авторы получили строгую корреляцию между величиной нейтронной экспозиции, оцениваемой из наблюдений как отношение  $[hs/ls]$  (избыток тяжелых ядер  $s$ -процесса относительно более легких), и величиной  $[s/Fe]$ , а также менее выраженную антикорреляцию между величиной  $[hs/ls]$  и металличностью  $[Fe/H]$ .

Как правило, в атмосферах кандидатов в PPN наблюдается сверхдефицит (относительно их металличности) тяжелых ядер, существование которого в атмосферах маломассивных сверхгигантов на стадии post-AGB пока не находит однозначного объяснения. Имеется ряд физических (дефицит водорода в атмосферах; сверхионизация атомов, имеющих низкий потенциал второй ионизации) и методических (ошибки параметров) эффектов, которые могли бы объяснить наблюдаемый сверхдефицит элементов  $s$ -процесса в атмосферах маломассивных сверхгигантов. Ни одно из предложенных объяснений не согласуется с полной картиной

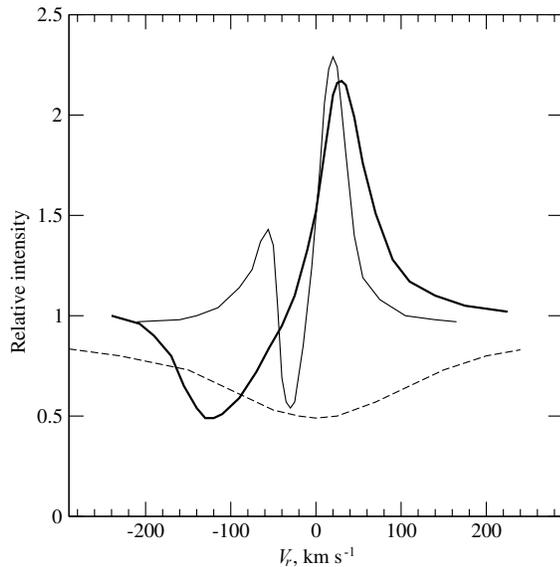
химического состава этих объектов. Низкая встречаемость этой формы обогащения атмосфер является следствием различий в эволюции AGB-звезд, различающихся исходной массой, поскольку именно первоначальная масса звезды влияет на возможные проявления нуклеосинтеза и на скорость потери вещества. В настоящее время установлено, что поверхностные слои менее массивных AGB-звезд (с начальными массами ниже  $4 M_{\odot}$ ) обогащаются углеродом и тяжелыми металлами — так возникают C-rich-звезды, а более массивные на последующих этапах своей эволюции остаются O-rich-звездами.

### 2.1. Спектральная мимикрия сверхгигантов

Важным свойством, определяющим достоверность результатов исследований AGB- и post-AGB-звезд, является высокое качество спектров высокого разрешения, получаемых на эшелельных спектрографах БТА. Для большинства звезд программы материал такого качества получен впервые, что позволило сделать ряд новых выводов относительно эволюционного статуса отдельных объектов, особенностей спектра, поля скоростей и химического состава атмосфер. Прежде всего упомянем наш вывод о неоднородности исследуемой выборки объектов в целом. По мере накопления спектров и результатов выяснилось, что исходная выборка звезд с большими избытками ИК-потока, помимо AGB- и post-AGB-звезд, включает массивные звезды высокой светимости с протяженными и структурированными околозвездными оболочками, поэтому необходимым и самым трудоемким моментом наших исследований является определение светимости и массы звезды, а следовательно, и фиксация ее стадии эволюции. При изучении индивидуальных звезд мы неоднократно обнаруживали подобие и даже полное повторение спектральных деталей у объектов различной природы: LBV-звезд, звезд с феноменом V[e], с большой вероятностью являющимися двойными системами промежуточной массы вскоре после стадии быстрого обмена веществом; белых и желтых гипергигантов и маломассивных сверхгигантов на стадии post-AGB с большими избытками ИК-излучения.

Парадоксально, но звезды высокой светимости, принципиально различающиеся по массам (самые массивные звезды с исходными массами выше  $20\text{--}40 M_{\odot}$  и звезды средних масс  $3\text{--}9 M_{\odot}$ ) и стадиям эволюции, имеют близкие наблюдаемые свойства: особенности оптических и радиоспектров, большие избытки ИК-излучения, сложное и переменное во времени поле скоростей, что свидетельствует о нестабильности протяженных атмосфер и расширяющихся газопылевых оболочек.

Это подобие наблюдаемых свойств объектов двух типов предопределяет проблему спектральной мимикрии [32].



**Рис. 1.** Профили  $H\alpha$  в спектрах избранных сверхгигантов различной исходной массы: классический сверхгигант  $\alpha$  Per — штриховая линия, гипергигант HD 33579 — тонкая сплошная, post-AGB-сверхгигант V510 Pup — жирная сплошная. По оси абсцисс указано смещение  $\Delta V_r$  относительно системной скорости каждого объекта.

Отличительными признаками оптического спектра гипергиганта считаются мощная эмиссия (зачастую двухпиковая) в линиях бальмеровской и пашеновской серий водорода, имеющая широкие крылья, обусловленные томсоновским рассеянием, а также наличие запрещенных эмиссий металлов. Однако надо иметь в виду, что сочетание этих деталей присутствует и в спектрах иных типов звезд высокой светимости (см. рис. 1). Для знакомства со свойствами этих массивных горячих сверхгигантов можно использовать работы [33–35] с хорошими примерами оптических спектров, полученных с высоким спектральным разрешением. Характерной особенностью спектров B[e]-звезд являются эмиссии в линиях ИК-триплета Ca II и в запрещенных линиях Ca[II] 7291 и 7324 Å. Эти профили хорошо согласуются с гипотезой о наличии вращающихся околозвездных дисков в системах B[e]-звезд. Для более подробного изучения спектров B[e]-звезд полезен также атлас спектров B[e]-звезды MWC 314 и гипергиганта V1302 Aql [36].

Надо иметь в виду, что только сочетание интенсивной (зачастую двухпиковой) эмиссии H II с

запрещенными эмиссиями металлов не дает оснований для классификации звезды в качестве гипергиганта. Принципиальным является обоснование высокой светимости и большого темпа потери вещества при невысокой скорости его истечения. Важен также детальный анализ картины лучевых скоростей, измеренных по линиям различной природы. Хорошо иллюстрирует эту проблему уже упомянутый выше атлас спектров [36], в котором сопоставлены спектры звезды MWC 314 ( $Sp = B3\text{Ibe}$ ) с феноменом B[e] и гипергиганта V1302 Aql (его  $Sp = F5\text{Ia}^+e$  на моменты наблюдений, использованные в атласе). Эти звезды различных масс, светимости и спектральных классов имеют подобные спектры. В частности, мощные эмиссионные линии водорода имеют двухпиковые профили. Спектры содержат множество разрешенных и запрещенных эмиссионных линий металлов и детали с профилями типа P Cyg.

Наиболее известным объектом, который много лет рассматривали как вероятную звезду на стадии post-AGB, является V1302 Aql, обладающая многочисленными пекулярностями спектра. Долгое время эволюционный статус сверхгиганта V1302 Aql, ассоциированного с мощным источником ИК-излучения IRC+10420, был неясен. Совокупность наблюдаемых свойств позволяла рассматривать ее как звезду на стадии post-AGB или же 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. Однако сведения, полученные в последние десятилетия в ходе различных наблюдательных экспериментов, а также результаты мониторинга с НЭС БТА [37–39] не оставляют сомнений в принадлежности V1302 Aql к крайне редко наблюдаемым объектам — желтым гипергигантам. Более того, V1302 Aql, светимость которого составляет  $L \approx 5 \times 10^5 L_{\odot}$ , рассматривается теперь как наиболее бесспорный массивный объект в Галактике (с исходной массой  $M \geq 20\text{--}40 M_{\odot}$ ) с рекордным темпом потери вещества, находящийся на стадии кратковременного эволюционного перехода от массивных красных сверхгигантов к звездам Вольфа–Райе [40].

## 2.2. Пекулярный сверхгигант V510 Pup

Еще один объект программы — сверхгигант V510 Pup — является наглядным примером спектральной мимикрии. Светимость этой звезды, ассоциируемой с ИК-источником IRAS 08005–2356, едва достигает уровня светимости нормального сверхгиганта, в то же время параметры ее ветра близки к параметрам ветра гипергигантов и даже

LBV [41]. В спектре V510 Pup аномально сильны абсорбции Y II и других элементов *s*-процесса. Все абсорбционные компоненты смещены в коротковолновую область спектра, что указывает на истечение звездного вещества. Околосредняя оболочка сверхгиганта проявляется в оптическом спектре, в частности, в виде молекулярных полос углеродсодержащих молекул C<sub>2</sub> и CN. Эмиссия в H $\alpha$  многократно превышает уровень континуума, что свидетельствует о мощном звездном ветре. Различия  $V_r$  в пределах одного спектра достигают 100 км с<sup>-1</sup> в основном за счет дифференциальных сдвигов эмиссионных и абсорбционных компонентов, но также и вследствие систематического изменения скорости с интенсивностью и длиной волны линии. Такие большие дифференциальные сдвиги линий ясно говорят о градиенте скорости в тех слоях атмосферы V510 Pup, где эти линии образуются, а множество профилей типа P Cyg — о расширении атмосферы.

### 2.3. Переменная V2324 Cyg

Впервые на БТА со спектрографом НЭС выполнена оптическая спектроскопия с высоким спектральным разрешением переменной V2324 Cyg (Sp = F3 Ie), ассоциируемой с ИК-источником IRAS 20572+4919. Результаты опубликованы Клочковой и др. [42]. В области длин волн от 4549 до 7880 Å отождествлено свыше 200 абсорбций (в основном Fe II, Ti II, Cr II, Y II, Ba II). Определены спектральный класс F0 III и скорость вращения  $V \sin i = 69$  км с<sup>-1</sup>. Линии нейтрального водорода и D-линии Na I имеют сложный профиль типа P Cyg. Ни систематический ход лучевой скорости с глубиной фотосферной линии, ни переменность  $V_r$  во времени не были обнаружены. Определено среднее значение гелиоцентрической лучевой скорости  $V_r = -16.8 \pm 0.6$  км с<sup>-1</sup>. Скорости по ядрам абсорбционных компонентов ветровых линий H $\beta$  и Na I колеблются от -140 до -225 км с<sup>-1</sup> (а скорости расширения соответствующих слоев — примерно от 120 до 210 км с<sup>-1</sup>). Максимальная скорость расширения получена по синему компоненту расщепленной абсорбции H $\alpha$ :  $V_r = 450$  км с<sup>-1</sup> на дату 12 декабря 1995 г. Методом моделей атмосфер определены параметры: эффективная температура  $T_{\text{eff}} = 7500$  К, ускорение силы тяжести  $\lg g = 2.0$ , микротурбулентная скорость  $V_t = 6.0$  км с<sup>-1</sup> и близкая к солнечной металличность.

Основной особенностью химического состава звезды является избыток лития и натрия. Избыток лития был найден также в спектрах post-AGB-звезды, ассоциированной с источником IRAS 04296+3429 [18]. Необходимо отметить,

что линия Li I 6707 Å имеет близкую соседку Ce II 6708.1 Å, поэтому может быть блендирована в спектрах звезд с большими избытками тяжелых металлов *s*-процесса. В частности, этим блендированием авторы [43] объяснили избыток лития, обнаруженный [44] в атмосфере центральной звезды IRAS 05341+0852.

На основании полученных результатов принадлежность V2324 Cyg к post-AGB-звездам поставлена под сомнение. Со стадией post-AGB не согласуется невысокая светимость звезды: спектральная классификация указывает на класс светимости III. Также не сочетаются со статусом post-AGB-звезды профиль линии H $\alpha$  и очень высокая скорость ветра, присущие обычно сверхгигантам. Упомянутый выше избыток лития в атмосфере звезды невысокой светимости наводит на мысль об альтернативной эволюционной фазе для V2324 Cyg. Феномен избыточного содержания лития в атмосферах F-гигантов с ИК-избытками уже известен. Часть этих Li-rich-гигантов, еще не достигших стадии AGB и наблюдаемых на красной ветви гигантов, имеет низкие массы, не более 2.5  $M_{\odot}$ . В качестве механизма производства лития для таких гигантов предлагается так называемый «cool bottom process», в основе которого лежит синтез бериллия, перенос его ядер к основанию конвективной оболочки и последующее разрушение до ядер лития в приповерхностных слоях звезды. Здесь уместно сослаться на работу [45], авторы которой определили содержание Li для выборки G-K гигантов и субгигантов с солнечной металличностью, и где наибольшие величины содержания Li получены для быстровращающихся звезд  $V \sin i > 30$  км с<sup>-1</sup>.

Принадлежность V2324 Cyg к гигантам согласуется с невысокой светимостью звезды  $M_V \approx 0^m 1$ , получаемой с использованием ее параллакса  $\pi = 1.55$  mas по данным Gaia DR2 и избытка цвета  $E(B - V) = 0^m 79$ , согласно [46]. Однако спектральные особенности V2324 Cyg в виде сильных эмиссий H I не позволяют окончательно принять для звезды V2324 Cyg статус красного гиганта. Профиль H $\alpha$  имеет тип P Cyg, его эмиссионный пик в 3–4 раза выше уровня континуума [42]. Сопоставление профилей H $\alpha$  в спектрах, полученных в разные моменты времени, указывает на их переменность: меняется форма и интенсивность эмиссии и глубина абсорбционного компонента. Положение эмиссионного пика и абсорбции также меняется. Особенности спектра скорее свидетельствуют о высокой светимости, а следовательно, и большей удаленности V2324 Cyg. Отметим, что авторы [46], моделируя распределение энергии, рассчитали полный поток излучения, получив при этом высокую светимость  $\lg L/L_{\odot} = 3.78$  и

расстояние  $d = 4.4$  кпк. Для уточнения природы этой звезды необходимо накопление информации не только о самом объекте, но и о звездах в направлении на ассоциацию Cas OB7, членом которой, по-видимому, является и V2324 Cyg.

#### 2.4. Обнаружение нового феномена в спектрах *post-AGB*-звезд

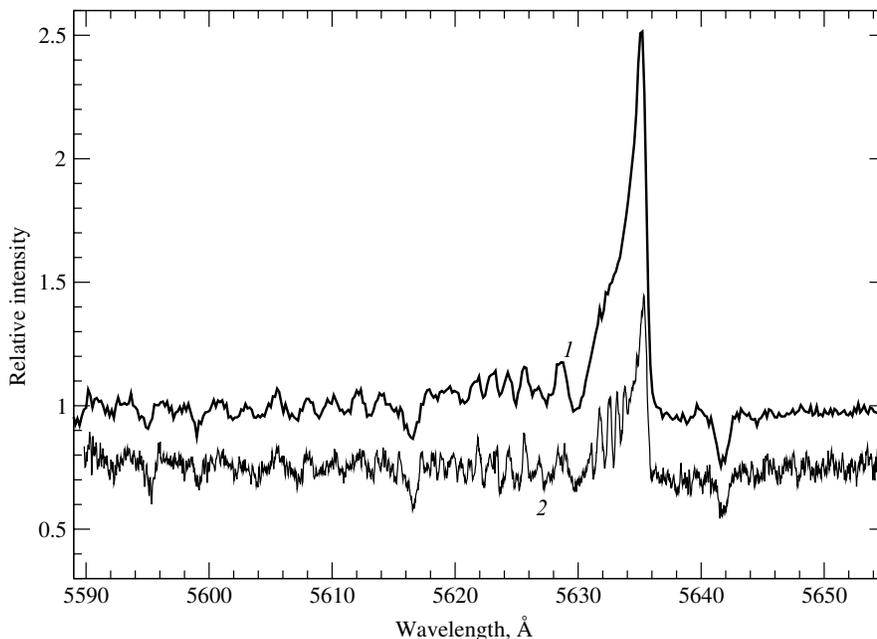
Как мы подчеркнули выше, важным результатом спектроскопического исследования *post-AGB*-звезд является то, что на основании изученной к настоящему времени выборки можно говорить о ее неоднородности по химическому составу. Избыток элементов *s*-процесса, ожидаемый для звезд на стадии *post-AGB* как следствие предшествующей эволюции звезды и процесса третьего перемешивания, встречается пока крайне редко. За два десятилетия поисков удалось обнаружить избытки элементов *s*-процесса лишь у семи *post-AGB*-звезд (детально исследованы около полусотни объектов). Анализ совокупности наблюдаемых свойств тех *post-AGB*-объектов, в атмосферах центральных звезд которых выявлены большие избытки углерода и тяжелых металлов, привел к выводу о том, что околозвездные оболочки этих избранных звезд имеют сложную морфологию [47]. Кроме того, их оболочки также обогащены углеродом, что проявляется в ИК-, радио и оптических спектрах, в наличии молекулярных линий и полос  $C_2$ ,  $C_3$ , CN, CO. На рис. 2 показана полоса системы Свана молекулы  $C_2$  в спектрах туманности RAFGL 2688 [22] по данным наблюдений в разные ночи на 6-м телескопе со спектрографом PFES [48], обеспечивающим спектральное разрешение  $R = 15\,000$  и со спектрографом НЭС [15],  $R = 60\,000$ .

Коллекция спектров, полученных при многолетней спектроскопии на БТА с высоким спектральным разрешением, послужила основой для изучения переменности спектров и переменности поля скоростей в атмосфере и оболочке звезды. Эта переменность объясняется истечением протяженных атмосфер в сочетании с пульсациями более глубоких атмосферных слоев. Детальное изучение [49] оптических спектров *post-AGB*-звезды HD 56126 (IRAS 07134+1005) в области длин волн от 4012 до 8790 Å, полученных с эшелльными спектрографами 6-м телескопа, привели к обнаружению сложной и переменной формы профилей сильных линий (H I, абсорбций Fe II, Y II, Ba II и др.), формирующихся в расширяющейся атмосфере (в основании ветра) звезды. Авторы [49] показали, что для изучения кинематики атмосферы необходимо измерение скоростей по отдельным деталям этих профилей. По

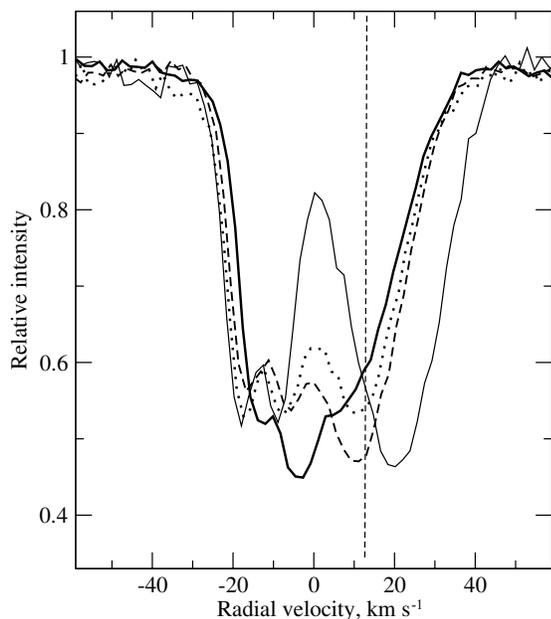
линиям металлов и молекулярным деталям обнаружены дифференциальные сдвиги линий, достигающие значения  $\Delta V_r = 15\text{--}30$  км с<sup>-1</sup>. В атмосфере звезды одновременно наблюдаются как расширяющиеся слои, так и слои, падающие на звезду. Сопоставление данных для разных моментов наблюдений приводит к выводу о переменности лучевой скорости и картины скоростей в целом. Положение молекулярного спектра стабильно во времени, что указывает на устойчивость процесса расширения околозвездной оболочки HD 56126, наблюдаемой в линиях  $C_2$  и Na I.

Для нескольких избранных объектов программы нами обнаружено неизвестное ранее для спектров *post-AGB*-звезд явление — асимметрия и/или расщепление сильнейших абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня. Рассмотрим подробнее этот эффект на примере спектра *post-AGB*-сверхгиганта V5112 Sgr, изученного Клочковой [50]. V5112 Sgr имеет обогащенную за счет третьего перемешивания оболочку, эмиссию на длине волны 21 μ, мощную и структурированную ИК-оболочку. Найденный эффект расщепления абсорбций максимален у линий ионов Ba II, в профилях которых в случае V5112 Sgr наблюдаются три компонента (см., например, рис. 3), причем форма профилей расщепленных линий и положение атмосферного («звездного») компонента меняются со временем, а положение околозвездных компонентов практически стабильно. Анализ картины скоростей, проведенный с использованием данных радиоспектроскопии объекта, позволил сделать вывод о том, что коротковолновые компоненты расщепленных абсорбций Ba II формируются в структурированной околозвездной оболочке, расширяющейся со скоростями  $V_{\text{exp}} \approx 20$  и 30 км с<sup>-1</sup>. Обнаружение оболочечных компонентов тяжелых металлов указывает на эффективный вынос в оболочку вещества, наработанного на предшествующем этапе эволюции звезды. Таким образом, впервые обнаружено обогащение оболочки звезды тяжелыми металлами, накопленными на стадии AGB.

Хорошим примером является также объект IRAS 23304+6147. В атмосфере слабой в оптическом диапазоне центральной звезды этого источника ранее найдены избытки углерода и тяжелых металлов [21]. Согласно наблюдениям с высоким пространственным разрешением на космическом телескопе HST [51], околозвездная оболочка в этой системе имеет сложную структуру, включающую мультиполь и протяженное гало с дугообразными деталями. Последующий спектральный мониторинг на БТА + НЭС привел к новым результатам [52]. В частности, сравнение



**Рис. 2.** Фрагменты спектров туманности RAFGL 2688 с эмиссионной полосой 5635.5 (0;1) системы Свана молекулы  $C_2$  в разные даты: 1 — по наблюдениям со спектрографом PFES, 2 — сдвинутый вниз на 0.2 — по данным, полученным со спектрографом НЭС.



**Рис. 3.** Профиль линии Ba II 4934 Å в спектрах V5112 Sgr, полученных в разные даты: тонкая сплошная линия — 2 августа 2012 г., жирная сплошная — 13 июня 2011 г., пунктирная — 14 августа 2006 г., штриховая — 7 июля 2001 г. Вертикальной штриховой линией указана системная скорость  $V_{\text{sys}} = 13 \text{ км с}^{-1}$ , согласно [50].

лучевой скорости  $V_r = -25.7 \text{ км с}^{-1}$ , полученной по многочисленным симметричным абсорбциям слабой и умеренной интенсивности, с ранее опу-

бликованными данными указывает на отсутствие значимых изменений скорости и ее совпадение с системной скоростью по радиоданным. Высокое спектральное разрешение позволило измерить положения 24 вращательных линий полосы (0;0)  $\lambda 5165 \text{ Å}$  системы Свана молекулы  $C_2$ . В результате определена типичная для звезд на стадии post-AGB скорость расширения околозвездной оболочки,  $V_{\text{exp}} = 15.5 \text{ км с}^{-1}$ . Кроме того, у полосы (0;1)  $5635 \text{ Å}$  системы Свана выявлен сложный эмиссионно-абсорбционный профиль. Впервые в оптическом спектре источника IRAS 23304+6347 обнаружена асимметрия профилей сильных абсорбций ионизованных металлов (Y II, Ba II, La II, Si II), обусловленная наличием у этих линий коротковолнового компонента, формирующегося в околозвездной оболочке. Положение длинноволнового компонента на профилях этих линий соответствует скорости по симметричным абсорбциям и совпадает с системной скоростью. Положение же коротковолнового компонента соответствует скорости по полосе Свана молекулы  $C_2$  и совпадает с положением околозвездного компонента профиля Na D1. Избыток кремния, синтез которого возможен за счет «hot bottom process» в горячих слоях конвективной оболочки у массивных AGB-звезд, позволяет говорить о принадлежности исследуемого объекта к звездам с исходными массами выше  $4 M_{\odot}$ .

К настоящему времени тяжелые металлы s-процесса выявлены в структурированных около-

звездных оболочках лишь у трех из тех *post-AGB*-звезд, в атмосферах которых найдены продукты третьего перемешивания. Таким образом, в результате многолетнего спектрального мониторинга на БТА обнаружен канал, по которому идет обогащение тяжелыми металлами *s*-процесса структурированной оболочки звезды, находящейся на стадии *post-AGB*.

Новые особенности в спектре были найдены также в результате анализа многократных наблюдений с высоким спектральным разрешением *post-AGB*-звезды V448 Lac [53]. Изучение поведения профилей спектральных деталей и поля скоростей в атмосфере и околозвездной оболочке позволило обнаружить асимметрию и временную переменность профилей сильнейших абсорбций с потенциалом возбуждения нижнего уровня  $\chi_{\text{low}} < 1$  эВ. Эти особенности проявляются прежде всего на профилях резонансных линий Ba II, Y II, La II, Si II. Пекулярность профилей может быть объяснена суперпозицией звездных абсорбций и оболочечных эмиссий. Впервые в спектре V448 Lac выявлена эмиссия в полосе системы Свана (0;1) 5635 Å молекулы C<sub>2</sub>. По ядру H $\alpha$  найдена переменность лучевой скорости с амплитудой  $\Delta V_r \approx 8$  км с<sup>-1</sup>. Переменность средней скорости по слабым линиям металлов с меньшей амплитудой  $\Delta V_r \approx 1-2$  км с<sup>-1</sup> может быть проявлением малоамплитудных пульсаций атмосферы. Кроме того, выявлены переменные во времени дифференциальные сдвиги линий в интервале  $\Delta V_r = 0-8$  км с<sup>-1</sup>. Положение молекулярного спектра стабильно во времени, что указывает на постоянство скорости расширения околозвездной оболочки, фиксируемой по линиям C<sub>2</sub> и Na I:  $V_{\text{exp}} = 15.2$  км с<sup>-1</sup>. Величина скорости расширения типична для *post-AGB*-звезд.

Впервые расщепление сильнейших абсорбций с потенциалом возбуждения нижнего уровня  $\chi_{\text{low}} < 1$  эВ было обнаружено в оптических спектрах *post-AGB*-звезды V354 Lac, также полученных со спектральным разрешением  $R = 60\,000$  на 6-м телескопе БТА [54]. Анализ кинематической картины показывал, что коротковолновый компонент расщепленной линии формируется в мощной газопылевой оболочке звезды. Неучет расщепления сильных линий при расчете химического состава приводит к завышенным избыткам элементов *s*-процесса (Ba, La, Ce, Nd) в звездной атмосфере. Обнаружена переменность профилей сильных абсорбций. В отличие от вышеупомянутых сведений для V448 Lac, для V354 Lac за 15 лет наблюдений зафиксировано отсутствие изменений скорости, что позволяет предположить стабильность поля скоростей в атмосфере и околозвездной оболочке V354 Lac.

## 2.5. Структурированные оболочки *post-AGB*-звезд

Получив новые результаты, касающиеся особенностей химического состава выборки *post-AGB*-звезд, окруженных сложными оболочками, мы попытались найти взаимосвязь особенностей химсостава атмосфер с особенностями строения их околозвездных оболочек. Звездный ветер объектов на стадии AGB обычно обладает сферической симметрией, что и определяет преимущественно сферическую форму медленно расширяющихся оболочек у этих звезд. Однако их ближайшие потомки — *post-AGB*-звезды — являются объектами, центральная звезда которых окружена, как правило, несферической оболочкой сложной структуры (биполярной и даже квадрупольной формы). Переход к этой сложной морфологии от преимущественно сферических оболочек AGB-звезд происходит именно на стадии *post-AGB*, что и обуславливает необходимость детального и многостороннего изучения этих объектов. Качественно новый уровень понимания структуры и кинематики оболочек вокруг далеко проэволюционировавших звезд обеспечивают их наблюдения с космическим телескопом HST (подробнее см. [51, 55]). Именно в таких наблюдениях была выявлена биполярная структура и джеты у многих объектов, ранее считавшихся точечными. Неоднородная асимметричная туманность RAFGL 2688, окружающая слабый в оптическом диапазоне F-сверхгигант V1610 Cyg, имеющая большую пространственную протяженность (основные детали ее структуры можно наблюдать даже с наземным телескопом) и демонстрирующая иерархию деталей разного масштаба, с различающимися скоростями, хорошо иллюстрирует сложность строения оболочек *post-AGB*-звезд.

По мере накопления детальных изображений выяснилось, что так называемые дуги, наблюдаемые в оболочках нескольких *post-AGB*-звезд, указывают на эпизодические изменения темпа потери массы, происходившие на стадии AGB. То обстоятельство, что дуги не замкнуты и несимметричны относительно центральной звезды, свидетельствует, что потеря массы происходила в ходе нескольких эпизодов усиления ветра с преобладанием выбросов в различных телесных углах.

На основе наблюдений репрезентативной выборки звезд, проведенных на БТА с высоким спектральным разрешением, Ключкова [47] рассмотрела особенности оптических спектров выборки *post-AGB*-звезд с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами *s*-процесса, и с обогащенными углеродом околозвездными оболочками. В результате сделан вывод о том, что пекулярности профилей линий: наличие эмиссионного компонента в D-линиях дублета Na I, характер

молекулярных деталей, асимметрия и расщепление профилей сильных абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня — связаны с кинематическими и химическими свойствами околозвездной оболочки и с типом ее морфологии. В частности, переменность наблюдаемых профилей абсорбционно-эмиссионной линии  $H\alpha$  и линий металлов, а также наблюдаемая у нескольких объектов смена типа (абсорбция/эмиссия) полос Свана молекулы  $C_2$  вызвана изменениями в структуре околозвездной оболочки. Тип профиля  $H\alpha$  (чисто абсорбционный, чисто эмиссионный, типа P Cyg или инверсного P Cyg, с двумя эмиссионными компонентами) 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 толщина оболочки.

Описанное выше расщепление на компоненты профилей сильнейших абсорбций тяжелых металлов в спектрах сверхгигантов V5112 Sgr, V354 Lac и центральной звезды ИК-источника IRAS 23304+6147 позволяет предположить, что процесс формирования структурированной околозвездной оболочки сопровождается ее обогащением продуктами звездного нуклеосинтеза. Попытки найти взаимосвязь между особенностями оптического спектра и морфологией околозвездной среды затруднены тем, что наблюдаемая структура оболочки сильно зависит от наклона оси симметрии к лучу зрения и от степени углового разрешения аппаратуры, как спектральной, так и используемой для получения прямых изображений.

## 2.6. Холодные AGB-сверхгиганты

Далеко проэволюционировавшие звезды на стадии AGB, наблюдаемые на короткой эволюционной фазе перехода к планетарной туманности, представляют собой маломассивные ядра с массой около  $0.6 M_{\odot}$ . Вырожденные ядра окружены протяженными газово-пылевыми оболочками, которые сформировались за счет существенной потери вещества звезды на предшествующих стадиях эволюции. Присутствие околозвездного газа и пыли проявляется в виде пекулярностей ИК-, радио- и оптических спектров PPN. Оптические спектры этих маломассивных сверхгигантов отличаются от спектров классических массивных сверхгигантов наличием молекулярных полос, налагающихся на спектр холодного сверхгиганта, аномалиями абсорбционно-эмиссионных профилей линий  $H I$ ,  $Na I$  и  $He I$ , а также присутствием эмиссионных линий некоторых металлов. Кроме того, все указанные спектральные особенности зачастую переменны во времени. В целом мы видим в оптических

спектрах AGB-сверхгигантов (и их потомков) следующие черты, отличающие их от спектров массивных сверхгигантов: комплексные профили линий нейтрального водорода, которые содержат переменные во времени абсорбционные и эмиссионные компоненты; абсорбционные или эмиссионные полосы молекул, преимущественно углеродосодержащих; оболочечные компоненты резонансных линий  $Na I$  и  $K I$ ; узкие запрещенные или разрешенные эмиссии металлов, формирующиеся в оболочке.

*R Sct* — полуправильная переменная типа RV Tau. Переменные сверхгиганты типа RV Tau находятся в полосе неустойчивости для звезд II типа населения. *R Sct* — ярчайший и неустойчивый представитель этих звезд, имеет период переменности около 142 дней. Киппер и Ключкова [56], используя спектры *R Sct*, полученные на БТА+НЭС и привлекая спектры из архива спектрополяриметра NARVAL телескопа TBL обсерватории Пик дю Миди, определили фундаментальные параметры, изучили особенности спектра и кинематической картины, а также рассчитали детальный химический состав атмосферы. Металличность звезды  $Fe/H \approx -0.5$ , при очень большом избытке углерода  $[C/Fe] = +0.84$ . Избыток тяжелых металлов *s*-процесса не обнаружен, поэтому высказано предположение, что звезда еще не испытала третьего перемешивания. Полученная эффективная температура  $T_{\text{eff}} = 4500$  К также указывает на то, что *R Sct* еще находится на стадии AGB.

В спектре *R Sct* обнаружено расщепление сильнейших абсорбций, а также присутствие слабой и переменной эмиссии в линиях  $Fe I$ ,  $Ti I$  [56]. Вблизи минимума блеска эмиссия наблюдается и в линиях  $H\alpha$ ,  $H\beta$ . Лучевая скорость, измеренная по слабым симметричным абсорбциям, изменяется с большой амплитудой. Картина лучевых скоростей, измеренных по спектральным деталям различного типа, изменяется со временем, а для избранных фаз наблюдается стратификация скорости.

*Холодный сверхгигант V1027 Cyg* отождествляется с ИК-источником IRAS 20004+2955. Квок [57] внес эту звезду в свой теперь широко известный список кандидатов в протопланетарные туманности. Однако до настоящего времени *V1027 Cyg* остается малоизученной, нет единого мнения об эволюционном статусе этой звезды. Архипова и др. [58] на основе *UBV*-фотометрии и спектроскопии низкого разрешения классифицировали эту звезду как полуправильную переменную с амплитудой изменения блеска, возрастающей от полосы *V* к *U* от  $0^m4$  до  $0^m8$ . Позже, измерив лучевые скорости с помощью корреляционного спектрометра, Архипова и др. [59] обнаружили переменность лучевой скорости в интервале от  $-10$  до  $+20$   $\text{km s}^{-1}$  и отметили усиление линий

Ва II. Ключкова и др. [60] по спектрам, полученным на эшелле-спектрографах 6-м телескопа БТА, методом моделей атмосфер определили основные параметры V1027 Cyg (эффективная температура  $T_{\text{eff}} = 5000$  К, ускорение силы тяжести  $\lg g = 1.0$ ), металличность  $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -0.2$  и содержания шестнадцати элементов в атмосфере звезды. Близкая к солнечной металличность в сочетании с невысокой лучевой скоростью звезды позволяют предположить, что V1027 Cyg принадлежит к населению диска Галактики.

Более детальное исследование особенностей спектра и поля скоростей в атмосфере V1027 Cyg проведено на основании наблюдений с высоким спектральным разрешением, выполненных с эшелльным спектрографом НЭС 6-м телескопа [61]. По симметричным абсорбциям малой и умеренной интенсивности выявлены слабые изменения лучевой скорости  $V_r(\text{abs})$  с амплитудой около  $5 \text{ км с}^{-1}$ , обусловленные пульсациями. В красной области спектра отождествлены многочисленные слабые линии молекулы CN и линия K17696 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. В спектре 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.

В спектре V1027 Cyg наблюдается длинноволновое и переменное во времени смещение профиля H $\alpha$ , что обусловлено искажением ядра и коротковолнового крыла линии. Впервые в спектре звезды обнаружено расщепление ядер сильнейших 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 системной скорости  $V_{\text{sys}} = 5.5 \text{ км с}^{-1}$ . Для более определенной трактовки картины лучевых скоростей, выделения околозвездного и фотосферного компонентов на профиле D-линий Na I, а следовательно, и для уточнения расстояния до звезды, и для фиксации ее эволюционного статуса необходима спектроскопия со *сверхвысоким* спектральным разрешением.

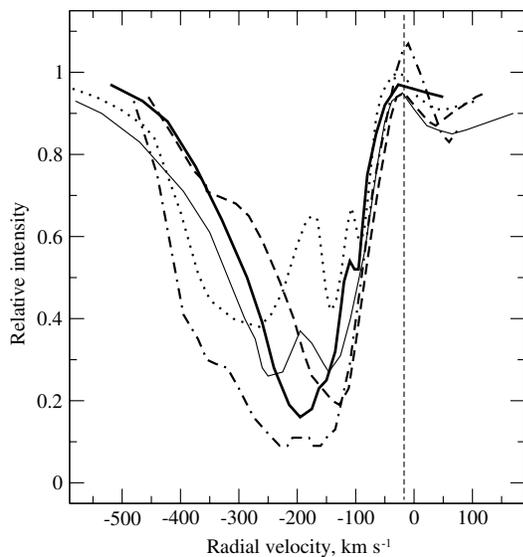
ИК-источник RAFGL 5081 (IRAS 02441+6922) был зарегистрирован в самых ранних балонных ИК-обзорах. Позже Квок и др. [62] внесли этот источник в список объектов-кандидатов в звезды на асимптотической ветви гигантов. К настоящему времени нет никаких сведений о центральной звезде источника RAFGL 5081. В базе данных

SIMBAD для этого объекта отсутствуют наблюдательные данные, как спектральные, так и фотометрические, в видимом диапазоне длин волн. Публикаций о наблюдениях ИК-источника RAFGL 5081 в других диапазонах длин волн крайне мало. Выполнив ИК-наблюдения RAFGL 5081 на CFHT с привлечением данных спутника IRAS, Квок и др. [62] отнесли этот объект к группе источников с максимумом ИК-излучения в области  $\lambda < 10 \mu$ , но не смогли сказать что-то определенное о его природе. Излучение в полосах CO, OH, H<sub>2</sub>O не зарегистрировано [63, 64].

Оптические спектры слабой в видимом диапазоне центральной звезды ИК-источника RAFGL 5081 впервые изучены [65] на основании долговременного спектрального мониторинга с высоким спектральным разрешением, проведенного на 6-м телескопе со спектрографом НЭС в 2001–2015 гг. Из сопоставления с родственными объектами спектральный класс звезды определен близким к G5–8 II, что согласуется с эффективной оценкой температуры звезды  $T_{\text{eff}} = 5400 \pm 100$  К, которая сделана по спектральным критериям. По эквивалентной ширине триплета кислорода O I 7773 Å  $W(\text{OI}) = 0.84 \text{ Å}$  в спектре компаньона RAFGL 5081 сделана предварительная оценка светимости:  $M_{\text{bol}} = -4^{\text{m}}$ . Невысокая светимость позволяет исключить вариант массивного красного сверхгиганта. В спектре компаньона RAFGL 5081 надежно отождествлена абсорбция Li I 6707 Å с эквивалентной шириной  $W \approx 0.1 \text{ Å}$ , что свидетельствует о принадлежности объекта к более массивным AGB-звездам с исходной массой  $M_{\text{init}} \geq 4 M_{\odot}$ .

В спектрах звезды обнаружен необычный спектральный феномен: широкие профили абсорбций средней и низкой интенсивности раздвоены и, в отличие от ветровых абсорбций, стационарны. Стационарность абсорбций исключает возможность объяснения аномальных профилей спектральной двойственностью звезды. Лучевые скорости для ветровых составляющих профилей D-линий Na I и H $\alpha$  достигают значений  $-250 \text{ км с}^{-1}$  и  $-600 \text{ км с}^{-1}$  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.

Для всех дат наблюдений измерены гелиоцентрические лучевые скорости  $V_r$ , соответствующие положению всех компонентов абсорбций металлов, а также D-линий Na I и H $\alpha$ . Анализ многокомпонентных профилей линий Na I(1) выявил наличие компонентов со скоростью  $V_r(\text{IS}) = -65 \text{ км с}^{-1}$ ,



**Рис. 4.** Пример переменности профиля  $H\alpha$  в избранных спектрах RAFGL 5081: тонкая сплошная линия — 7 марта 1999 г., штрихпунктирная — 1 декабря 2001 г., штриховая — 22 февраля 2003 г., пунктирная — 14 января 2006 г., сплошная жирная — 3 февраля 2007 г. Вертикальной штриховой линией указана системная скорость  $V_{\text{sys}} = -21 \text{ km s}^{-1}$  из [65].

на основании чего сделан вывод о том, что RAFGL 5081 находится за рукавом Персея, т.е. не ближе 2 кпк.

### 2.7. Обнаружение спектральной двойственности (SB2) звезды BD-6°1178

Мало изученная холодная звезда BD-6°1178 отождествлена с IRAS 05238-0626 — ИК-источником на галактической широте  $b \approx -22^\circ$ . Из-за наличия избытка излучения в области 12–60  $\mu$  и с учетом положения на диаграмме ИК-цветов этот объект принято считать кандидатом в протопланетарные туманности [66]. Для объекта были найдены признаки фотометрической переменности [67]: средняя звездная величина в системе, близкой к фильтру  $R$ , меняется в интервале  $[10^m 78; 10^m 87]$  при средней ошибке порядка  $0^m 01$ . Что касается спектроскопии BD-6°1178, то до наблюдений на БТА были опубликованы лишь сведения о спектрах низкого разрешения, примерно 5  $\text{\AA}/\text{пиксель}$ , на основании которых сделана оценка спектрального класса: F2 II [68]. По спектрам высокого спектрального разрешения, полученным на БТА + НЭС в произвольные даты, была проведена спектральная классификация и детально изучены профили абсорбций и поле скоростей в атмосфере звезды [69]. Результаты количественной спектральной классификации звезды BD-6°1178 привели к выводу о спектральной двойственности звезды. Оба компонента являются F-звездами,

F5 IV–III + F3 V, с близкими скоростями вращения: 24 и 19  $\text{km s}^{-1}$ . Для четырех моментов наблюдений измерены величины гелиоцентрической лучевой скорости обоих компонентов двойной системы. Это двухспектровая спектрально-двойная с довольно узкими и хорошо разделяемыми линиями. Максимальный зафиксированный взаимный сдвиг спектров компонентов — около 120  $\text{km s}^{-1}$ .

В целом не найдено оснований для классификации BD-6°1178 как post-AGB-звезды. Координаты BD-6°1178 и расстояние до нее  $d \approx 450 \pm 37$  пк позволяют предположить ее принадлежность к ассоциации Ori OB1. Таким образом, BD-6°1178 может быть молодым объектом диска Галактики на стадии до ГП. Заметим, что ранее Торрес и др. [70], исследуя выборку кандидатов в звезды типа T Tau, включили в нее и BD-6°1178. На основе анализа спектральных и фотометрических данных эти авторы нашли 17 новых звезд типа T Tau и 13 новых звезд типа Ae/Be Хербига. Однако ни в одну из этих групп они не смогли включить BD-6°1178, отнеся ее к группе объектов смешанного типа («miscellaneous»).

Обнаружение спектральной двойственности типа SB2 также дает нам повод сомневаться в классификации BD-6°1178 как post-AGB-звезды, поскольку среди известных звезд на этой эволюционной стадии нет двойных SB2. Ряд post-AGB-звезд является двойными системами, но типа SB1. Природа их невидимого компаньона неизвестна, так как его детали в спектрах двойных post-AGB-звезд не наблюдаются. Компаньоном может быть либо белый карлик, либо маломассивная звезда ГП.

Особенности post-AGB-звезд в двойных системах представлены в обзорах ван Винкеля [71, 72]. Подчеркнем, что Хривнак и др. [73] в результате долговременного мониторинга не обнаружили двойные системы среди PPN с деталью 21  $\mu$  и с атмосферами, обогащенными тяжелыми металлами.

### 2.8. Звезды, приближающиеся к стадии PN

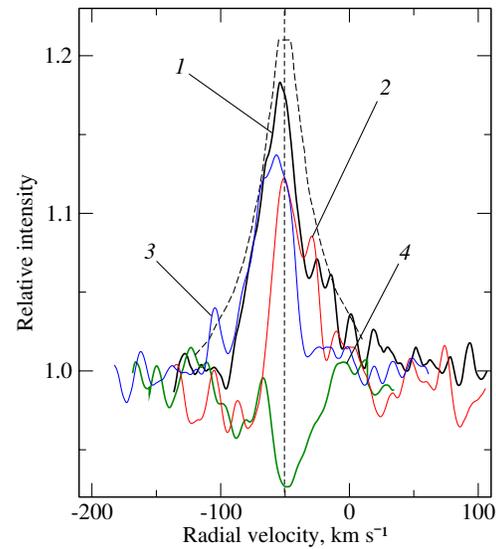
Наша программа включает также ряд горячих звезд, близко подошедших к стадии планетарной туманности.

ИК-источник IRAS 01005+7910 (далее в тексте IRAS 01005) расположен высоко над плоскостью Галактики, его широта  $b = 16^\circ 6'$ . В оптическом диапазоне объект отождествлен с безымянным пекулярным В-сверхгигантом. Положение источника на диаграмме цветов IRAS согласуется со стадией протопланетарной туманности. Фотометрическая переменность IRAS 01005 изучалась несколькими группами. Хривнак и др. [74] отметили переменность блеска объекта на очень короткой для протопланетарных туманностей шкале, менее

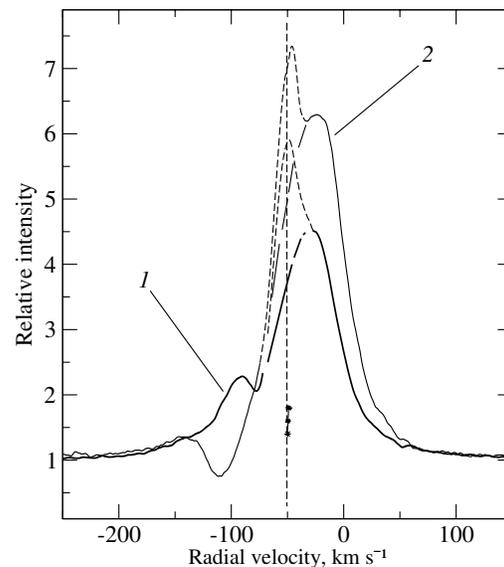
нескольких дней. Архипова и др. [75] в ходе долговременного фотометрического мониторинга, проведенного в  $UBV$ -полосах для нескольких горячих объектов, включая IRAS 01005, обнаружили быструю и нерегулярную переменность их блеска. Опираясь на эти наблюдения малоамплитудной переменности, авторы [75] пришли к выводу о вариациях параметров звездного ветра у этих звезд и (или) о наличии микропульсаций с характерными периодами в несколько часов.

Принципиальные результаты для центральной звезды IRAS 01005 получены в статье [76], авторы которой, определив фундаментальные параметры этого сверхгиганта ( $T_{\text{eff}} = 21\,500$  К, ускорение силы тяжести на ее поверхности  $\lg g = 3.0$ , металличность  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.31$  и содержания ряда химических элементов), подтвердили для него стадию post-AGB. Большая галактическая широта в сочетании с пониженной металличностью указывает на принадлежность IRAS 01005 к старому населению Галактики. Важным результатом этой работы является обнаружение избытка углерода ( $\text{C}/\text{O} > 1$ ) в атмосфере центральной звезды, в ИК-спектре околосредней оболочки которой обнаружены спектральные детали углеродосодержащей молекулы — фуллерена  $\text{C}_{60}$  [77].

После обнаружения переменности спектра IRAS 01005 на 6-м телескопе был проведен мониторинг его центральной звезды с высоким спектральным разрешением,  $R = 60\,000$ . По 23 спектрам определены спектральный класс центральной звезды  $\text{B}1.5 \pm 0.3$  и класс светимости Ib, отождествлены многочисленные спектральные детали, включая множество запрещенных, рассмотрена переменность их профилей и лучевой скорости [78]. По положению симметричных и стабильных профилей запрещенных эмиссий [N I], [N II], [O I], [S II] и [Fe II] определена системная скорость  $V_{\text{sys}} = -50.5$  км с $^{-1}$ . Присутствие запрещенных эмиссий [N II] и [S II] указывает на начало ионизации околосредней оболочки и близость стадии планетарной туманности. Различия лучевой скорости  $V_r$  по ядрам линий, порядка 34 км с $^{-1}$ , частично вызваны деформациями профилей переменными эмиссиями. Перепад  $V_r$  по крыльям линий меньше, примерно равен 23 км с $^{-1}$ , и может быть следствием пульсаций или/и скрытой двойственности звезды. Деформации профилей абсорбционно-эмиссионных линий могут быть связаны с изменениями их абсорбционных (фото-сферных) составляющих с вариациями геометрии и кинематики в основании ветра (см. рис. 5). Наш материал позволяет утверждать, что за двое суток изменения скорости достигают уверенно измеряемой величины.



**Рис. 5.** Вариации профилей Si II в спектре IRAS 0100: 1 — эмиссия Si II(2) 6347 (29 мая 2013 г.); 2 и 3 — профили Si II(2) 6347 Å, полученные 13 апреля 2003 г. и 15 ноября 2005 г. соответственно; 4 — среднее из эмиссионно-абсорбционных профилей Si II(3) 4128 и 4130 Å (29 мая 2013 г.). Штриховая линия — наружная огибающая набора всех профилей Si II 5979 Å. Прерывистая вертикаль — принятая системная скорость. Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.



**Рис. 6.** Профили  $\text{H}\alpha$  в спектре IRAS 01005, полученные 18 января 2005 г. — 1 и 9 мая 2004 г. — 2. Штрихи — оболочечные эмиссии, прерывистые линии — участки ветровых профилей под ними. Вертикальная штриховая прямая фиксирует лучевую скорость для запрещенных эмиссий, цепочка крестиков рядом с ней — бисектор для нижней части профиля 18 января 2005 г.

Как хорошо видно на рис. 6, линии  $\text{H}\alpha$  в спектре

центральной звезды IRAS 01005 имеют ветровые профили типа P Cyg III. Показано, что отклонения ветра от сферической симметрии невелики. Зафиксированы переменная скорость ветра (в интервале  $27\text{--}74 \text{ км с}^{-1}$  для разных моментов наблюдений) и большая интенсивность длинноволновой эмиссии (превышение уровня континуума до семи раз), что характерно не для классических сверхгигантов, а для гипергигантов. Для пяти основных компонентов D-линий Na I гелиоцентрические лучевые скорости составляют:  $V_r = -72.5, -65.3, -52.2, -27.7$  и  $-10.2 \text{ км с}^{-1}$ , что в пределах ошибок совпадает с опубликованными данными. Слабый компонент,  $V_r = -52.2 \text{ км с}^{-1}$ , формируется в звездной атмосфере, два более длинноволновых компонента являются межзвездными, формирующимися в Местном рукаве. Наличие компонента  $V_r = -65.3 \text{ км с}^{-1}$ , по-видимому, возникающего в межзвездной среде рукава Персея, позволяет рассматривать  $d = 2.5$  кпк как нижнюю оценку расстояния до IRAS 01005. Самый коротковолновый компонент,  $V_r = -72.5 \text{ км с}^{-1}$ , может формироваться в околозвездной оболочке, расширяющейся с типичной для PPN скоростью  $V_{\text{exp}} \approx 22 \text{ км с}^{-1}$ .

В кооперации с группой специалистов из ГАИШ проведено комплексное исследование (долговременная фотометрия, спектроскопия умеренного и высокого разрешения) нескольких родственных горячих звезд, близких к фазе PN: V1853 Cyg (IRAS 20462+3416) [79], V886 Her (IRAS 18062+2410) [80], StH $\alpha$ 62 (IRAS 07171+1823) [81]. Фотометрические параметры этих объектов меняются с амплитудой, примерно равной  $0^{\text{m}}2\text{--}0^{\text{m}}3$ . Их оптические спектры несколько различаются, что обусловлено небольшим различием в степени приближения к фазе планетарной туманности. Спектр В-сверхгиганта V886 Her включает комплексные линии H II с мощными эмиссионными компонентами, абсорбционные линии ионов легких металлов, запрещенные эмиссии, а также богатый небулярный спектр оболочки [80].

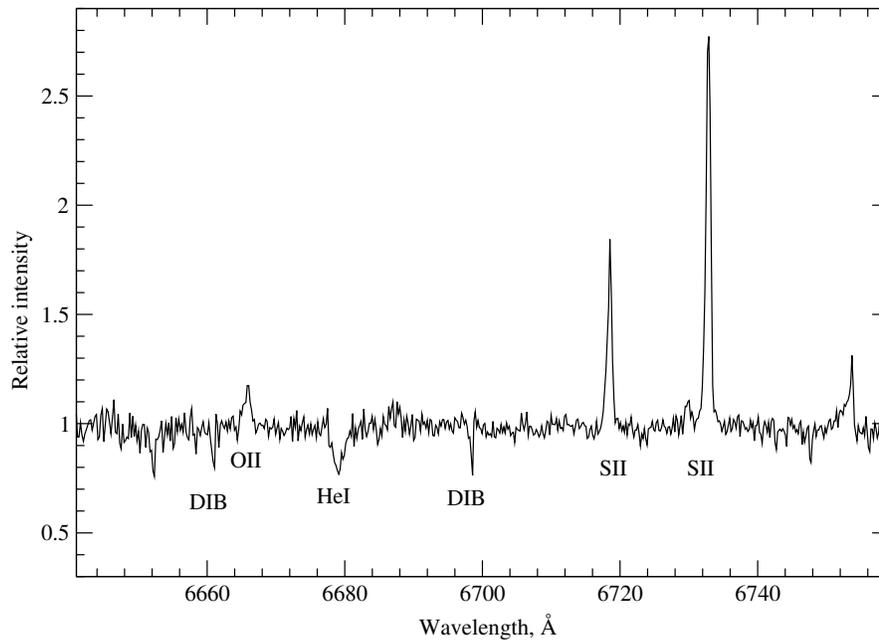
Те же методы были использованы при изучении свойств высокоширотной планетарной туманности G 199.4+14.3 [81]. Спектр ее центральной звезды StH $\alpha$ 62 в диапазоне  $\lambda$  4330–7340 Å содержит абсорбционные линии, соответствующие спектральному классу Sp = B0.5, в сочетании с эмиссионными линиями газовой оболочки. На рис. 7 для примера показан фрагмент спектра StH $\alpha$ 62, полученного на 6-м телескопе со спектрографом PFES [48], содержащий запрещенные линии [S II]  $\lambda$  6716.45 и 6730.85 Å. Наличие запрещенных эмиссий [N II] и [S II] позволило авторам [81] оценить плотность и температуру газовой оболочки звезды, значения

которых являются обычными для планетарных туманностей низкого возбуждения в области формирования линий [S II] и [N II], где ионизация газа еще только начинается. Скорость расширения наружной оболочки по запрещенным линиям составила  $12\text{--}13 \text{ км с}^{-1}$ . В предположении, что звезда является маломассивным ( $M = 0.55 \pm 0.05 M_{\odot}$ ) протопланетарным объектом, получена оценка расстояния  $d = 5.2 \pm 1.2$  кпк. Как показано в работе [81], основные характеристики и особенности оптического спектра V1853 Cyg близки к таковым у StH $\alpha$ 62.

HD 331319 — post-AGB-кандидат, оптический компонент ИК-источника IRAS 19475+3119. Для него с эшелле-спектрографом 6-м телескопа впервые получены новые результаты. Методом моделей атмосфер определены фундаментальные параметры и детальный химический состав атмосферы [82]. Особо значимым результатом является обнаружение линий гелия в спектре этого объекта с эффективной температурой  $T_{\text{eff}} = 7200 \text{ К}$ . Избыток гелия в наблюдаемых слоях атмосферы проинтерпретирован как следствие синтеза этого элемента в ходе предшествующей эволюции звезды. Обнаружен также избыток азота и кислорода:  $[N/Fe]_{\odot} = +1.30 \text{ dex}$ ,  $[O/Fe]_{\odot} = +0.64 \text{ dex}$  при небольшом избытке углерода. Металличность атмосферы звезды  $[Fe/H]_{\odot} = -0.25$  незначительно отличается от солнечной. Содержание металлов s-процесса занижено относительно металличности: для Y, Zr  $[X/Fe]_{\odot} = -0.68$ . Содержание бария также занижено относительно металличности:  $[Ba/Fe]_{\odot} = -0.47$ . Линия Li 6707 Å не обнаружена ни в одном из полученных спектров звезды. В целом распространенность химических элементов вызывает сомнения в принадлежности объекта IRAS 19475+3119 к эволюционной стадии post-AGB. Металличность в сочетании с лучевой скоростью  $V_r = -3.4 \text{ км с}^{-1}$  и галактической широтой  $|b| = 2^{\circ}7$  объекта указывают на его принадлежность к населению диска Галактики. По положению абсорбционных полос, формирующихся в околозвездной оболочке, определена скорость расширения оболочки  $V_{\text{exp}} \approx 21 \text{ км с}^{-1}$ .

## 2.9. Спектральные атласы

Работая с высококачественным спектральным материалом, получаемым нами на БТА для сверхгигантов различных типов (разные спектральные классы, классы светимости, стадия эволюции, особенности химического состава), мы считали необходимым этапом нашей работы создание спектральных атласов. Опубликованы следующие атласы, актуальные для данного контекста: спектров гипергигантов и сверхгигантов [83], спектра



**Рис. 7.** Фрагмент спектра StNa62 в интервале, содержащем запрещенные линии [S II]  $\lambda$  6717 и 6730 Å. Отождествлены основные детали фрагмента.

канонической post-AGB-звезды HD 56126 [84]. В атласе [85] проведено сопоставление спектров маломассивного post-AGB-сверхгиганта BD+48°1220 (IRAS 05040+4820), пекулярного сверхгиганта 3 Pup (IRAS 07418–2850) и массивного сверхгиганта  $\alpha$  Cyg (IRC+50337).

Детальное изучение спектра post-AGB-сверхгиганта BD+48°1220 было выполнено в работе [86], авторы которой методом моделей атмосфер определили основные параметры звезды и химический состав ее атмосферы, незначительно отличающийся от солнечного. При небольшом избытке элементов железного пика,  $[\text{Met}/\text{H}]_{\odot} = +0.20$ , найдены слабые избытки содержания углерода и азота  $[\text{C}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.25$ ,  $[\text{N}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.27$ . Элементы  $\alpha$ -процесса Mg, Si и Ca имеют небольшой избыток в среднем  $[\alpha/\text{H}]_{\odot} = +0.12$ . Выявлен большой избыток натрия,  $[\text{Na}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.75$ , что, вероятно, является следствием выноса в атмосферу вещества, переработанного в NeNa-цикле.

Очевидно, что спектральные атласы, опубликованные в доступном виде, способствуют сохранению наблюдательных данных и бесспорно облегчают последующую работу спектроскопистов, в т.ч. начинающих. Наши атласы содержат спектральный материал как в графическом представлении, так и в виде таблиц с подробным отождествлением всех спектральных деталей. Большая часть этих атласов доступна в цифровом виде в Интернете.

### 2.10. Межзвездные и околозвездные детали

Принципиально новый результат получен также в отношении формирования загадочных спектральных деталей, отождествляемых с так называемыми диффузными межзвездными полосами (DIBs). Оказалось, что в спектре V5112 Sgr значение лучевой скорости по DIBs совпадает со скоростью по коротковолновой оболочечной компоненте D-линий Na I, что позволило сделать вывод о формировании DIBs в околозвездной оболочке [50]. Известны несколько программ, нацеленных на поиск DIBs в околозвездных оболочках, однако все попытки были безуспешны: найденные оболочечные детали впоследствии не были подтверждены. Основываясь на обширном и высококачественном спектральном материале, обеспечивающем высокую точность позиционных измерений в спектрах, а также имея большой опыт работы со спектрами, мы впервые получили надежный положительный результат в долговременном поиске аналогов DIBs в околозвездной среде.

Отметим, что Клочкова и др. [52] в спектре центральной звезды IRAS 23304+6147 измерили положения пяти абсорбций, которые можно отождествить с DIBs: 5797, 6196, 6203, 6207, 6613 Å. Среднее для них значение скорости  $V_r$  (DIBs) =  $-15 \text{ km s}^{-1}$ . Если же отбросить полосу 6613 Å, которая блендирована в спектре исследуемого сверхгиганта сильной линией Y II, то получаем среднюю скорость  $V_r$  (DIBs) =  $-14.0 \pm 1.3 \text{ km s}^{-1}$ , близкую к скорости по самому длинноволновому

компоненту D-линий Na I,  $V_r = -13.2 \text{ км с}^{-1}$ . Таким образом, приходим к выводу о том, что в случае IRAS 23304+6147 полосы DIBs формируются в межзвездной среде. Итак, звезда V5112 Sgr пока остается единственной на стадии post-AGB, в спектре которой найдены полосы DIBs, формирующиеся в околозвездной оболочке [50].

### 3. ОСОБЫЕ ПРЕДСТАВИТЕЛИ СЕМЕЙСТВА POST-AGB-ЗВЕЗД

Остановимся вкратце на некоторых особых типах звезд, наблюдаемых на стадии post-AGB. Первым для нас этапом в изучении post-AGB-кандидатов были F-сверхгиганты на высоких галактических широтах. Звездой-прототипом для них является пекулярный сверхгигант UU Her. В 80-е гг. этим странным объектам уделялось много внимания, что было связано с внутренним противоречием изначального представления о них как о классических сверхгигантах, пребывающих на столь высоких широтах Галактики. Однако последующее изучение химического состава и иных наблюдаемых свойств этих звезд показало, что и UU Her, и родственные ему объекты являются далеко проэволюционировавшими *маломассивными* звездами, принадлежащими к старому населению Галактики. Таким образом, было устранено противоречие между высокой светимостью звезд типа UU Her и их расположением на высоких широтах Галактики.

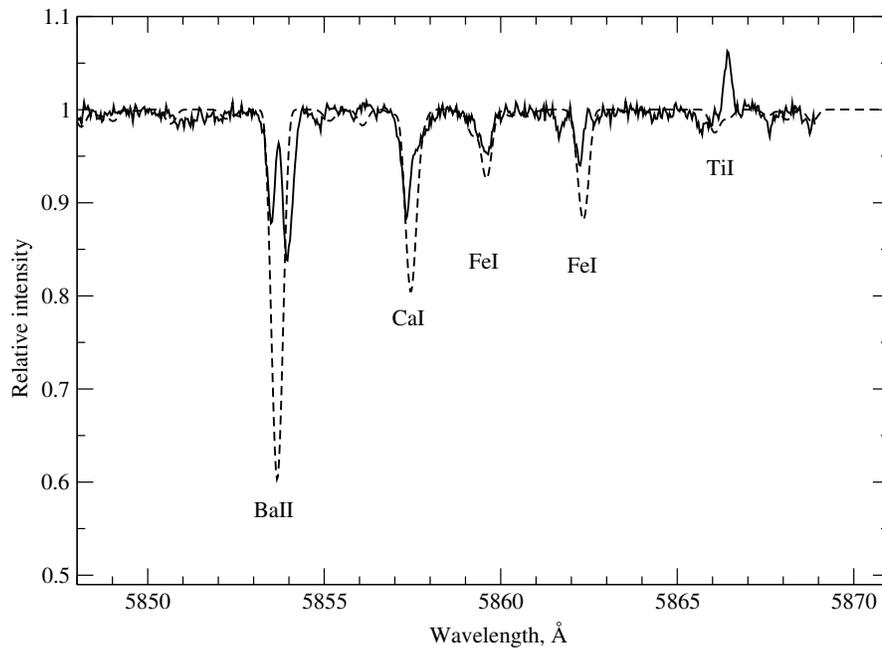
*Высокоширотный сверхгигант LN Hya* относится к полуправильным переменным, которые являются далеко проэволюционировавшими звездами на стадии post-AGB. Наблюдения LN Hya, проведенные на 6-м телескопе с высоким спектральным разрешением в 2003–2011 гг., позволили детально изучить особенности ее оптического спектра и поля скоростей в атмосфере [87]. По слабым симметричным фотосферным абсорбциям найдены изменения лучевой скорости от даты к дате с амплитудой до  $3 \text{ км с}^{-1}$ , что является следствием слабых пульсаций. Долгое время эмиссия в H $\alpha$  считалась единственной особенностью спектра LN Hya. Однако в результате спектрального мониторинга с высоким спектральным разрешением мы обнаружили пекулярность и переменность профилей сильных линий Fe I, Fe II, Ba II, Si II, и др. Впервые выявлена асимметричная форма профилей этих линий: их коротковолновые крылья вытянуты, а ядра либо раздвоены, либо искажены эмиссией. Наиболее интересным оказался наблюдательный сезон 2010 г., в течение которого от спектра к спектру изменялись положение и глубина абсорбционного компонента H $\alpha$ , интенсивность коротковолнового и длинноволнового эмиссионных компонентов, а также отношение их интенсивностей. В спектре 1 июня 2010 г. появились

слабые эмиссии нейтральных атомов (VI, Mn I, Co I, Ni I, Fe I), что хорошо видно на спектральном фрагменте, представленном на рис. 8. Эти особенности спектра звезды, зарегистрированные впервые, дают нам основание предполагать, что в 2010 г. нам удалось зафиксировать кратковременное изменение физических условий в верхних слоях атмосферы LN Hya.

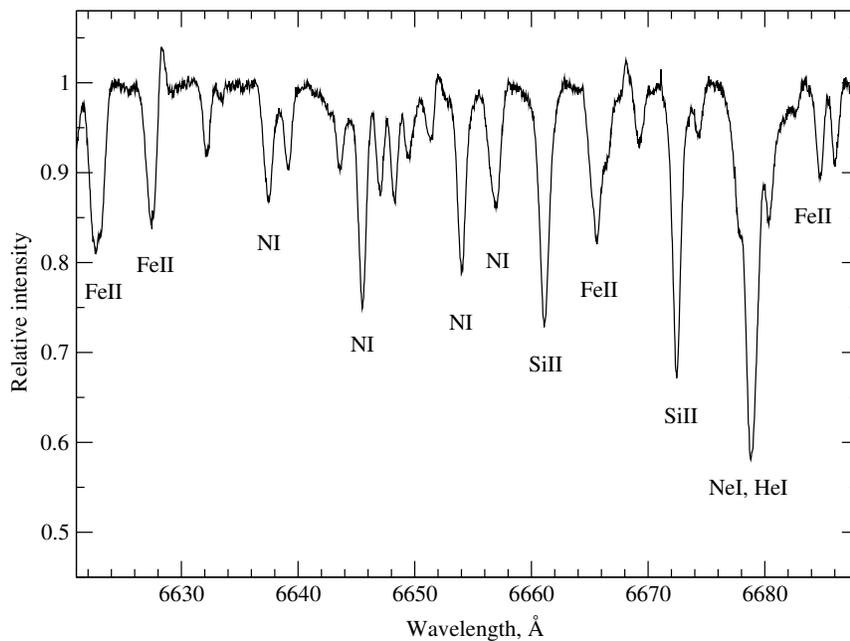
#### 3.1. Тесные двойные с большим дефицитом водорода

Особой подгруппой звезд на стадии post-AGB является крайне малочисленная группа двойных систем с большим дефицитом водорода (HdBs). Прототип этих тесных двойных — достаточно яркая звезда  $v$  Sgr (HD 181615). В настоящее время известны только четыре звезды типа HdBs, причем эти объекты имеют очень близкие эффективные температуры, около 10 000 К. Предполагается, что post-AGB-компаньон в составе этих двойных систем находится в фазе горения гелия в слое, окружающем вырожденное C-O-ядро. Время жизни гелиевого сверхгиганта — всего около  $10^4$  лет, что и объясняет редкую встречаемость HdBs-звезд. Природа второго, невидимого, компонента системы остается пока неизвестной. Пристальный интерес к этим объектам вызван тем, что, согласно современным представлениям, они считаются предшественниками сверхновых SN Ia.

В настоящее время хорошо изучены A-сверхгиганты  $v$  Sgr и KS Per. Основными особенностями сверхгиганта  $v$  Sgr (Sp = A2 Ia) являются сильная и переменная эмиссия в H $\alpha$  и большой избыток ИК-потока. По спектрам, полученным на БТА со спектрографом НЭС, с привлечением данных из архива 2-м телескопа обсерватории Пик дю Ми-ди, Киппер и Клочкова [88] определили детальный химический состав атмосферы сверхгиганта в системе  $v$  Sgr. Содержание водорода понижено на пять порядков при небольшом дефиците железа  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.8 \text{ dex}$ . Интересно, что для звезды KS Per (ИК-источник IRAS 04453+4311) получен аналогичный дефицит водорода. В атмосферах обеих звезд найден большой избыток азота и заметные избытки тяжелых металлов. На рис. 9 представлен фрагмент спектра  $v$  Sgr, насыщенный аномально сильными линиями атома NI. Редкой для этой стадии эволюции особенностью спектра  $v$  Sgr являются многочисленные эмиссии металлов и их ионов, областью формирования которых может быть оболочка вокруг двойной системы или диск.



**Рис. 8.** Фрагмент с эмиссией Ti I  $\lambda$  5866.40 Å в спектрах LN Нуа, полученных в спокойном (2 апреля 2010г. — штриховая линия) и в возбужденном (1 июня 2010 г. — сплошная линия) состояниях атмосферы звезды. Указано отождествление основных спектральных линий данного фрагмента.



**Рис. 9.** Фрагмент спектра  $\nu$  Sgr с сильными линиями азота. Отождествлены основные спектральные линии данного фрагмента [88].

### 3.2. Звезды на стадии поздней вспышки в гелиевом слое

Знаменитый сверхгигант FG Sge в течение последних 100 лет демонстрирует высокую скорость эволюции: на протяжении жизни одного поколения наблюдателей звезда пересекла диаграмму

Герцшпрунга–Рессела. Блекер и Шенбернер, моделируя эволюционное поведение звезд малых и промежуточных масс, отдельную работу [89] посвятили эволюции FG Sge. Заинтересованных читателей мы отсылаем к этой публикации, не останавливаясь здесь на ней подробно. Ван Джен-

дерен и Гаутчи [90], собрав данные фотометрии FG Sge за 100 лет наблюдений, восстановили ход ее эволюции от состояния горячей звезды  $Sp = O3$  в 1880 г. (центральная звезда планетарной туманности He 1–5) до холодной звезды спектрального класса K2 в 1992 г. При этом радиус звезды увеличился более чем на два порядка от 1 до  $184 R_{\odot}$ . Ибен и МакДональд [91] назвали поведение немногочисленных объектов этого типа «born again behavior», или в русскоязычной версии — «вновь рожденные». В результате «очень поздней» He-вспышки в слое звезда-ядро планетарной туманности вместо движения к фазе белого карлика возвращается к AGB. Напомним, что «очень поздней» слоевой вспышкой называется вспышка, наблюдаемая у далеко проэволюционировавшей — до состояния ядра PN — звезды после окончательного выгорания водородного топлива [89]. Этот возврат к AGB сопровождается ростом светимости звезды до  $4^m$  и снижением эффективной температуры на десятки тысяч градусов. Причем столь серьезные изменения параметров звезды происходят за очень короткое время, около 5–15 лет! При этом атмосфера звезды обедняется водородом и обогащается элементами CNO-группы и элементами s-процесса [91].

В феврале 1996 г. японский астроном-любитель Y. Sakurai зарегистрировал вспышку пекулярного объекта, названного затем в его честь объектом Sakurai (V4334 Sgr). В течение 1996 г. звездная величина объекта возросла с  $12^m.5$  до  $11^m.2$ . Классифицированный по скорости изменения блеска в ходе вспышки как медленная новая, он был отнесен к пекулярным объектам после получения в ESO на телескопе 3.6-м первых спектров, которые не соответствовали ожидаемому спектру новой. В марте 1996 г. на прямых ПЗС-изображениях объекта Sakurai, полученных на телескопе 0.9-м ESO, вокруг объекта была обнаружена планетарная туманность. Дуербек и Бенетти [92], изучив спектры низкого разрешения, сделали вывод о значительном ослаблении линий нейтрального водорода при наличии сильных линий углерода и кислорода; по совокупности наблюдаемых особенностей они отнесли вспыхнувший объект к звездам типа R CrB. Первые спектры высокого разрешения V4334 Sgr были получены на 2.7-м телескопе обсерватории Мак-Дональд [93] и на БТА в июне 1996 г. В результате анализа этих спектров и расчета химического состава методом моделей атмосфер [93, 94] обнаружено понижение содержания водорода на 3 dex, (причем оно снизилось на 0.7 dex с мая по октябрь 1996 г.) и избыток углерода и большие избытки Li и тяжелых металлов Sr, Y, Zr. Киппер [95] детально рассмотрел изменения параметров, спектра и химического состава V4334 Sgr по результатам спектроскопии звезды на БТА после

вспышки. Обнаруженный дефицит водорода и металличности, избыток тяжелых металлов и высокая лучевая скорость указывают на принадлежность объекта к старым протопланетарным туманностям в балдже Галактики.

Теперь принято считать, что объект Sakurai испытал очень позднюю гелиевую вспышку в слое, после которой вступил в быструю заключительную эволюционную фазу на стадии post-AGB [89]. Таким образом, изучение объекта Sakurai дает еще одну возможность тестировать теоретическое моделирование процессов эволюции ядер планетарных туманностей и околозвездных оболочек, потери вещества, конвекции, звездного нуклеосинтеза и изменения поверхностного химического состава. В этом отношении объект Sakurai можно поставить наравне с FG Sge.

Согласно модели эволюции звезды [91], в результате слоевой гелиевой вспышки следует ожидать увеличение светимости до 10 раз и изменение  $T_{\text{eff}}$  от 40 000 K до 6300 K за 17 лет. Параметры моделей, полученные Эсплундом и др. [93] и Киппером и Клочковой [94], позволяют утверждать, что V4334 Sgr эволюционирует быстрее (в течение полугода его температура понизилась на 600 K). Несмотря на близость эволюционной фазы FG Sge и V4334 Sgr, темп эволюции этих объектов существенно различается. FG Sge прошла цикл «очень поздней» слоевой He-вспышки примерно за 100 лет, а V4334 Sgr — в 10–15 раз быстрее. Лаулор и МакДональд [96] на основе модельных расчетов эволюции изучили явление «очень поздней» He-вспышки в слое и пришли к выводу, что различие в темпе эволюции FG Sge и V4334 Sgr можно объяснить, предположив, что FG Sge наблюдается при медленном *повторном* возврате к AGB, а V4334 Sgr — при быстром первом. Лаулор и МакДональд [96] подчеркивают, что повторный медленный возврат к AGB возможен при условии низкой эффективности конвективного перемешивания. Для проверки этого объяснения необходим дальнейший очень длительный мониторинг обоих объектов. Клэйтон и др. [97] считают, что «вновь рожденная» звезда V605 Aql по своим спектральным свойствам, кривой блеска и эволюции пылевой оболочки ближе к V4334 Sgr, чем к звезде FG Sge.

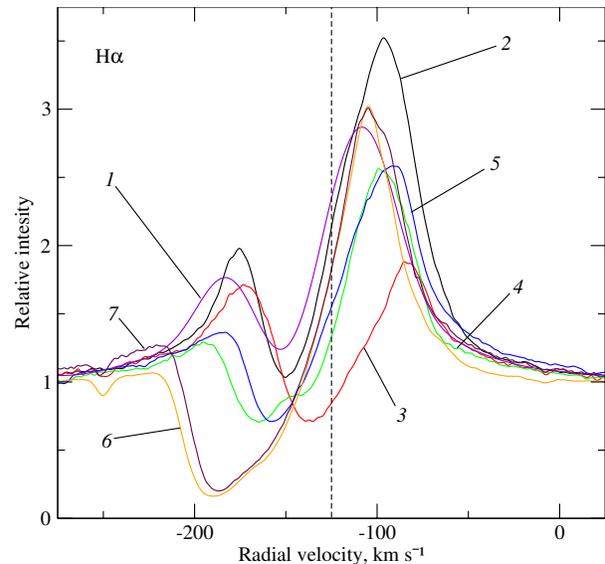
Уже спустя год после вспышки вокруг V4334 Sgr началось формирование плотной пылевой оболочки, которая значительно ослабила видимый поток, и объект стал недоступен для спектроскопии высокого разрешения в оптическом диапазоне. Согласно результатам радионаблюдений, эта недавно сформировавшаяся оболочка имеет биполярную структуру, в отличие от сферической формы, наблюдавшейся ранее [98].

### 3.3. Звезда на стадии эволюции до AGB

В список кандидатов в протопланетарные туманности входит звезда *V534 Lyr* (*HD 172324*), расположенная на высокой галактической широте ( $b = 18^\circ 58'$ ). Помимо высокой широты, дополнительным стимулом к изучению *V534 Lyr* для нас служила эмиссия в линиях H II, обнаруженная еще в ранней работе [99] и подтвержденная позднее [100]. В дальнейшем эта звезда изучалась неоднократно с помощью различных фотометрических систем и спектральными методами, но к настоящему времени ни в одной из имеющихся публикаций нет определенного вывода об ее эволюционном статусе. На основании многократных наблюдений на 6-м телескопе с эшелльным спектрографом НЭС детально изучены особенности оптического спектра *V534 Lyr* и поведение во времени гелиоцентрической лучевой скорости, соответствующей положению всех компонентов абсорбций металлов, а также D-линий Na I и H $\alpha$  [101]. Анализ поля скоростей спектральных деталей 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  $V_{\text{sr}} \approx -105 \text{ км с}^{-1}$ . Оценка расстояния  $d \approx 6 \text{ кпк}$  для высокоширотной звезды приводит к значению абсолютной величины:  $M_v \approx -5^{\text{m}}3$ , что согласуется с ее спектральной классификацией. Обнаружен неизвестный ранее для этой звезды спектральный феномен: раздвоение профилей избранных абсорбций металлов в отдельные моменты наблюдений. Во всех случаях, когда раздвоение присутствует в спектре, оно достигает больших значений:  $\Delta V_r = 20\text{--}50 \text{ км с}^{-1}$ .

Спектральный класс звезды близок к A0 Ib, а эффективная температура  $T_{\text{eff}} \approx 10\,500 \text{ К}$ . Металличность, надежно определенная методом моделей атмосфер по линиям металлов группы железа, незначительно отличается от содержания Fe:  $[\text{Met}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.06$ . 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

диск у Галактики. Совокупность наблюдаемых особенностей *V534 Lyr*: наличие вероятных пульсаций в глубоких слоях атмосферы, наблюдаемое в отдельные моменты раздвоение профилей абсорбций металлов с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня, пониженная металличность, тип и переменность эмиссионно-абсорбционного профиля H $\alpha$  (см. рис. 10) и H $\beta$  — позволяет отнести звезду к переменным звездам II типа населения выше HB. В ходе последующей эволюции она может



**Рис. 10.** Профили линии H $\alpha$  в спектре *V534 Lyr* для разных моментов наблюдений: 1 — 8 июля 2000 г.; 2 — 6 апреля 2010 г.; 3 — 1 июня 2010 г.; 4 — 24 сентября 2010 г.; 5 — 12 ноября 2013 г.; 6 — 8 июня 2017 г.; 7 — 13 июня 2017 г. Прерывистая вертикаль — принятая системная скорость  $V_{\text{sys}} \approx -125 \text{ км с}^{-1}$  [101]. Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.

приблизиться к полосе нестабильности, а затем и к стадии AGB. В итоге авторы [101] пришли к выводу о несоответствии принадлежности *V534 Lyr* стадии post-AGB.

## 4. ВЫВОДЫ И НОВЫЕ ЗАДАЧИ

В работе кратко рассмотрены важнейшие проблемы и сведения, касающиеся заключительных стадий эволюции звезд различных масс и процессов нуклеосинтеза в ходе эволюции этих объектов. Приведены результаты, полученные при проведении на 6-м телескопе спектрального исследования выборки пекулярных сверхгигантов, отождествляемых с галактическими ИК-источниками. Исходный список post-AGB-кандидатов был представлен Квоком в обзоре [57]. Из этого списка нами изучены все звезды, доступные по координатам, имеющие видимый блеск  $V \leq 13^{\text{m}}1$ . Основные аспекты нашей программы — поиск эволюционных изменений химического состава звезд, прошедших стадию AGB и третье перемешивание, а также анализ спектральных проявлений кинематических процессов в их протяженных атмосферах и оболочках. Наиболее значительным результатом программы является обнаружение избытков элементов  $s$ -процесса у семи post-AGB-звезд, что эмпирически подтверждает теорию эволюции звезд данного типа. У трех из этих звезд впервые обнаружен вынос тяжелых металлов  $s$ -процесса в околозвездные оболочки.

Ожидаемый избыток лития зарегистрирован в атмосферах пекулярных сверхгигантов V2324 Cyg и V4334 Sgr (объект Sakurai). Атмосфера «вновь рожденной» звезды V4334 Sgr обогащена углеродом и тяжелыми металлами  $s$ -процесса. Избыток лития, заподозренный для двух слабых в оптическом диапазоне центральных звезд ИК-источников RAFGL 5081 и IRAS 04296+3429, может быть следствием блендирования линии Li I 6707 линией Ce II.

Результаты исследования кинематики атмосфер и оболочек послужат уточнению баланса вещества, производимого звездами на стадиях AGB и post-AGB и поставляемого в ISM. До сих пор в моделях химической эволюции Галактики используется приближение, где в сферически-симметричных оболочках звезд вещество движется только в одном направлении.

Полученные в ходе выполнения программы спектроскопии PPN результаты позволяют нам выделить приоритетные направления в дальнейшем изучении объектов на стадии перехода от звезды к планетарной туманности и родственных объектов. Во-первых, требуется продолжение исследования проблемы «спектроскопической мимикрии», которая позволяет пекулярным маломассивным сверхгигантам маскироваться под самые массивные звезды высокой светимости. Во-вторых, по нашему мнению, в будущем следует сосредоточиться на спектральном мониторинге избранных переменных и быстро эволюционирующих объектов. В-третьих, необходимо детальное исследование структуры околозвездных оболочек, привлекая и метод спектрополяриметрии, для уяснения механизмов истечения и аккреции вещества.

Подчеркнем, что программа мониторинга сверхгигантов различной природы является предельной для спектроскопии высокого спектрального разрешения даже на самых крупных телескопах. С наблюдательной точки зрения задача усложняется необходимостью многократных наблюдений переменных объектов, а также высокими требованиями к стабильности аппаратуры и, в частности, к высокой точности позиционных измерений. Новый аспект спектроскопии звезд высокой светимости с ИК-избытками, состоящий в исследовании околозвездных оболочек, включая молекулярную спектроскопию, предполагает среди прочего требования увеличить долю спектрополяриметрии высокого разрешения (первый опыт ее уже получен [102]) и обеспечить сверхвысокое разрешение  $R \geq 10^5$ . Важность повышения спектрального разрешения иллюстрируют рис. 2 и 3. На рис. 2 хорошо видно, что только с разрешением не менее 60 000 возможно выделение вращательной структуры молекулярной полосы. Таким образом, наша программа стимулирует дальнейшее развитие и совершен-

ствование спектрального комплекса БТА, а также систем обработки спектральных данных и методов их анализа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен своим соавторам, участвовавшим в выполнении программы спектроскопии сверхгигантов на БТА и в подготовке совместных публикаций. В работе использованы базы астрономических данных SIMBAD, SAO/NASA ADS, Gaia DR2, AAVSO и VALD.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Автор благодарит за финансовую поддержку Российский фонд фундаментальных исследований (11-02-00319 а, 14-02-00291 а и 18-02-00029 а).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 5 (1997).
2. L. Mattsson, S. Höfner, and F. Herwig, *Astron. and Astrophys.* **470**, 339 (2007).
3. W. Vlemmings, *IAU Symp.* **283**, 176 (2012).
4. W. H. T. Vlemmings, *IAU Symp.* **302**, 389 (2014).
5. F. Herwig, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43**, 435 (2005).
6. S. Cristallo, L. Piersanti, O. Straniero, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **197**, 17 (2011).
7. F. Käppeler, R. Gallino, S. Bisterzo, and W. Aoki, *Rev. Modern Phys.* **83**, 157 (2011).
8. U. Battino, M. Pignatari, C. Ritter, et al., *Astrophys. J.* **827**, 30 (2016).
9. I. Iben, Jr., and A. Renzini, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **21**, 271 (1983).
10. N. Liu, R. Gallino, S. Cristallo, et al., *Astrophys. J.* **865**, 112 (2018).
11. M. Di Criscienzo, P. Ventura, D. A. García-Hernández, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462**, 395 (2016).
12. T. Aikawa, *Astron. and Astrophys.* **514**, A45 (2010).
13. H. E. Bond, *Nature* **356**, 474 (1992).
14. S. S. Rao, S. Giridhar, and D. L. Lambert, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **419**, 1254 (2012).
15. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61**, 820 (2017).
16. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, *J. Opt. Technol.* **76**, 42 (2009).
17. V. G. Klochkova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **272**, 710 (1995).
18. V. G. Klochkova, R. Szczerba, V. E. Panchuk, and K. Volk, *Astron. and Astrophys.* **345**, 905 (1999).

19. V. G. Klochkova and T. Kipper, *Baltic Astron.* **15**, 395 (2006).
20. L. Zacs, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **275**, 764 (1995).
21. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 88 (2000).
22. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 439 (2000).
23. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, N. S. Tavolghanskaya, and V. V. Kovtyukh, *Astronomy Letters* **29**, 748 (2003).
24. H. Van Winckel and M. Reyniers, *Astron. and Astrophys.* **354**, 135 (2000).
25. E. J. Bakker, E. F. van Dishoeck, L. B. F. M. Waters, and T. Schoenmaker, *Astron. and Astrophys.* **323**, 469 (1997).
26. B. E. Reddy, E. J. Bakker, and B. J. Hrivnak, *Astrophys. J.* **524**, 831 (1999).
27. B. J. Hrivnak, G. Van de Steene, H. Van Winckel, et al., *Astrophys. J.* **846**, 96 (2017).
28. A. Mishra, A. Li, and B. W. Jiang, *Astrophys. J.* **825**, 68 (2016).
29. A. Li, J. M. Liu, and B. W. Jiang, *Astrophys. J.* **777**, 111 (2013).
30. T. Chigai, T. Yamamoto, C. Kaito, and Y. Kimura, *Astrophys. J.* **587**, 771 (2003).
31. L. Decin, H. Van Winckel, C. Waelkens, and E. J. Bakker, *Astron. and Astrophys.* **332**, 928 (1998).
32. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **62**, 19 (2018).
33. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and A. S. Miroshnichenko, *Astrophysical Bulletin* **65**, 150 (2010).
34. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **71**, 33 (2016).
35. A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, K. S. Bjorkman, and V. E. Panchuk, *Astron. and Astrophys.* **390**, 627 (2002).
36. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and N. S. Tavolghanskaya, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **48**, 25 (1999).
37. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **292**, 19 (1997).
38. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **46**, 139 (2002).
39. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, A. S. Miroshnichenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 4183 (2016).
40. G. Meynet and A. Maeder, *Astron. and Astrophys.* **404**, 975 (2003).
41. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **48**, 301 (2004).
42. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **63**, 112 (2008).
43. M. Reyniers, H. Van Winckel, E. Biémont, and P. Quinet, *Astron. and Astrophys.* **395**, L35 (2002).
44. B. E. Reddy, M. Parthasarathy, G. Gonzalez, and E. J. Bakker, *Astron. and Astrophys.* **328**, 331 (1997).
45. G. Jasiewicz, A. Recio-Blanco, P. de Laverny, et al., *Astron. and Astrophys.* **453**, 717 (2006).
46. S. B. Vickers, D. J. Frew, Q. A. Parker, and I. S. Bojičić, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, 1673 (2015).
47. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 279 (2014).
48. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1997).
49. V. G. Klochkova and Y. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **51**, 994 (2007).
50. V. G. Klochkova, *Astronomy Letters* **39**, 765 (2013).
51. R. Sahai, M. Morris, C. Sánchez Contreras, and M. Claussen, *Astron. J.* **134**, 2200 (2007).
52. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavolghanskaya, *Astronomy Letters* **41**, 14 (2015).
53. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavolghanskaya, **54**, 234 (2010).
54. V. G. Klochkova, *Astronomy Letters* **35**, 457 (2009).
55. T. Ueta, M. Meixner, and M. Bobrowsky, *Astrophys. J.* **528**, 861 (2000).
56. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astron.* **17**, 195 (2008).
57. S. Kwok, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 63 (1993).
58. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, R. I. Noskova, and S. Y. Shugarov, *Sov. Astron. Lett.* **18**, 175 (1992).
59. V. P. Arkhipova, V. F. Esipov, N. P. Ikonnikova, et al., *Astronomy Letters* **23**, 690 (1997).
60. V. G. Klochkova, T. V. Mishenina, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 398 (2000).
61. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavolghanskaya, *Astronomy Letters* **42**, 815 (2016).
62. S. Kwok, B. J. Hrivnak, and R. T. Boreiko, *Astrophys. J.* **312**, 303 (1987).
63. L.-A. Nyman, R. S. Booth, U. Carlstrom, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **93**, 121 (1992).
64. J. G. A. Wouterloot, J. Brand, and K. Fiegler, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **98**, 589 (1993).
65. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., **61**, 962 (2017).
66. P. Garcia-Lario, A. Machado, S. R. Suso, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **82**, 497 (1990).
67. P. R. Woźniak, W. T. Vestrand, C. W. Akerlof, et al., *Astron. J.* **127**, 2436 (2004).
68. B. E. Reddy and M. Parthasarathy, *Astron. J.* **112**, 2053 (1996).
69. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 272 (2008).
70. C. A. O. Torres, G. Quast, R. de La Reza, et al., *Astron. J.* **109**, 2146 (1995).
71. H. van Winckel, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **41**, 391 (2003).
72. H. Van Winckel, *Baltic Astron.* **16**, 112 (2007).
73. B. J. Hrivnak, W. Lu, D. Bohlender, et al., *Astrophys. J.* **734**, 25 (2011).
74. B. J. Hrivnak, W. Lu, R. E. Maupin, and B. D. Spitzbart, *Astrophys. J.* **709**, 1042 (2010).

75. V. P. Arkhipova, M. A. Burlak, V. F. Esipov, et al., *Astronomy Letters* **39**, 619 (2013).
76. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, A. S. Miroshnichenko, et al., *Astron. and Astrophys.* **392**, 143 (2002).
77. Y. Zhang and S. Kwok, *Astrophys. J.* **730**, 126 (2011).
78. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 439 (2014).
79. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, R. I. Noskova, et al., *Astronomy Letters* **27**, 719 (2001).
80. V. P. Arkhipova, V. G. Klochkova, and G. V. Sokol, *Astronomy Letters* **27**, 99 (2001).
81. V. P. Arkhipova, V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, et al., *Astronomy Letters* **32**, 661 (2006).
82. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavalzhanskaya, *Astronomy Letters* **28**, 49 (2002).
83. E. L. Chentsov, S. V. Ermakov, V. G. Klochkova, et al., *Astron. and Astrophys.* **397**, 1035 (2003).
84. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavganskaya, and M. V. Shapovalov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 162 (2007).
85. V. G. Klochkova, E. G. Sendzikas, and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 99 (2015).
86. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavalzhanskaya, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **51**, 642 (2007).
87. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **56**, 104 (2012).
88. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astron.* **21**, 219 (2012).
89. T. Bloeker and D. Schoenberner, *Astron. and Astrophys.* **324**, 991 (1997).
90. A. M. van Genderen and A. Gautschy, *Astron. and Astrophys.* **294**, 453 (1995).
91. I. Iben, Jr. and J. MacDonald, in *White Dwarfs*, Ed. by D. Koester and K. Werner (Berlin, Springer Verlag, 1995), p. 48 (*Lecture Not. Phys.*, **443**).
92. H. W. Duerbeck and S. Benetti, *Astrophys. J.* **468**, L111 (1996).
93. M. Asplund, B. Gustafsson, D. L. Lambert, and N. Kameswara Rao, *Astron. and Astrophys.* **321**, L17 (1997).
94. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Astron. and Astrophys.* **324**, L65 (1997).
95. T. Kipper, *Baltic Astron.* **10**, 403 (2001).
96. T. M. Lawlor and J. MacDonald, *Astrophys. J.* **583**, 913 (2003).
97. G. C. Clayton, F. Kerber, N. Pirzkal, et al., *Astrophys. J.* **646**, L69 (2006).
98. P. A. M. van Hoof, S. Kimeswenger, G. Van de Steene, et al., *Galaxies* **6**, 79 (2018).
99. W. K. Bonsack and J. L. Greenstein, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **68**, 249 (1956).
100. A. Arellano Ferro, S. Giridhar, and P. Mathias, *Astron. and Astrophys.* **368**, 250 (2001).
101. V. G. Klochkova, E. G. Sendzikas, and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **73**, 52 (2018).
102. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and A. S. Miroshnichenko, *Astronomy Reports* **48**, 288 (2004).

## Spectroscopy of Supergiants with Infrared Radiation Excess: Results of 1998–2018

V. G. Klochkova

We shortly summarize here the results of the second stage (1998–2018) of the detailed spectroscopy program of peculiar supergiants identified with galactic infrared sources, performed at the 6-m BTA telescope. The main aspect of the program is a search for the evolutionary variations in the chemical composition of stars, past the AGB stage and the third mixing, as well as an analysis of spectral manifestations of kinematic processes in their extended, often unstable, atmospheres and in the envelopes. The most significant result is detection of the *s*-process element excesses in seven single post-AGB stars, which empirically confirms the theory of evolution of this type of stars. In three of these stars we for the first time discovered the outflow of the *s*-process heavy metals to the circumstellar envelopes. A lithium excess was found in the atmospheres of peculiar supergiants V2324 Cyg and V4334 Sgr. The results of investigation of the kinematics of atmospheres and shells will clarify the equilibrium of matter produced by stars in the AGB and post-AGB stages and delivered to the interstellar medium (ISM).

Keywords: *stars: evolution—supergiants—extended atmospheres—circumstellar matter—nuclear reactions, nucleosynthesis, abundances*