

УДК 524.3-54; 524.3:524.86; 524.3-852; 520.84

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗБРАННЫХ ПРОГРАММ СПЕКТРОСКОПИИ ЗВЕЗД НА БТА САО РАН С ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОГРАФОМ НЭС

© 2022 В. Г. Клочкова<sup>1\*</sup>, В. Е. Панчук<sup>1</sup>, М. В. Юшкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 17 ноября 2021 года; после доработки 14 декабря 2021 года;  
принята к публикации 14 декабря 2021 года

В течение двух последних десятилетий на 6-м телескопе со спектрографом НЭС выполняется спектроскопия звезд в широком диапазоне масс на далеких стадиях эволюции. Исследования охватывают разнообразные типы звезд с высоким темпом потери вещества на предшествующих и текущей стадиях эволюции. Все эти звезды имеют протяженные атмосферы и структурированные околосредные оболочки, сформировавшиеся за счет интенсивного звездного ветра. Исследованы голубые переменные высокой светимости (LBV) вблизи эддингтоновского предела стабильности; горячие сверхгиганты с феноменом В[е], с большой вероятностью являющиеся двойными системами промежуточной массы вскоре после стадии быстрого обмена массами; группа желтых гипергигантов, а также обширная выборка маломассивных post-AGB-сверхгигантов. Из-за разнообразия типов звезд, которые объединяет наличие оболочки, спектроскопия этих объектов представляет собой многостороннюю задачу. Помимо выявления особенностей химического состава и уяснения роли сверхгигантов в обогащении межзвездной среды свежесинтезированными элементами, этапы исследования включают фиксацию стадии эволюции изучаемых объектов, а также поиск и анализ спектральных проявлений кинематических процессов в их протяженных и нестабильных атмосферах и в газопылевых оболочках. Для детального изучения нестабильности кинематического состояния атмосфер проведен спектральный мониторинг избранных объектов. Начаты исследования звезд на соседних эволюционных стадиях. В настоящем обзоре представлены наиболее значимые результаты наблюдений по программам 1998–2021 гг.

Ключевые слова: *звезды: эволюция — звезды: нуклеосинтез — звезды: атмосферы — техника: спектроскопия*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Опыт спектроскопии звезд на 6-м телескопе, накопленный авторами (КВГ и ПВЕ) в течение первых двадцати лет работы БТА (Panchuk 1998), позволил выделить типы наблюдательных программ, выполнение которых на многопрограммном телескопе представлялось продуктивным. Прежде всего, это программы, подготовка к выполнению которых не требует серьезных затрат квалифицированного обслуживающего персонала. Поэтому мы ориентировались преимущественно на создание (или развитие) аппаратуры, стационарно размещаемой на платформах фокусов Нэсмита БТА (Gazhur et al. 1990, Klochkova et al. 1991, Monin and Panchuk 2002, Panchuk et al. 1993). Во-вторых, как показал опыт, программы, требующие наблюдений в заведомо определенных моменты времени, трудно совместимы с многопрограммным статусом телескопа.

Предпочтение мы отдаем обзорным программам в сочетании с продолжительным мониторингом избранных объектов. При этом требование наблюдать в фиксированные моменты времени не является первостепенным, что, с учетом информации о повторяемости ярких ночей (Erokhin and Plyaskin 1983) и о качестве изображений на БТА (Panchuk and Afanas'ev 2011), увеличивает вероятность успешного выполнения наблюдений. Из программ, соответствующих таким требованиям, в области наших научных интересов находятся программы изучения объектов верхней части диаграммы Герцшпрунга–Рессела (H–R). Диапазон параметров исследуемых объектов широк, и это потребовало достаточно разнообразных навыков, приобретенных при анализе результатов программ, выполненных в конце XX века (Klochkova and Panchuk 1998).

Вещество, теряемое за счет ветра и истечения (или сброса) оболочки, как правило, предварительно переработано в процессах нуклеосинтеза

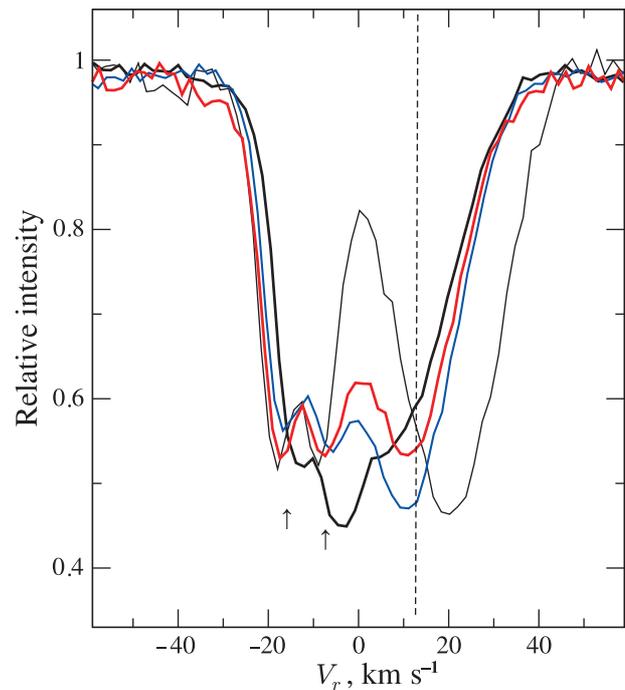
\*E-mail: [Valentina.R11@yandex.ru](mailto:Valentina.R11@yandex.ru)

на предшествующих стадиях эволюции. На исследуемых фазах эволюции потеря вещества происходит с изменением темпа и зачастую с низким уровнем симметрии. Нижняя граница скоростей относительных движений в атмосферах и оболочках исследуемых объектов составляет  $1\text{--}3 \text{ км с}^{-1}$ , поэтому с 1998 г. мы предпочитаем использовать спектрограф НЭС БТА (Panchuk et al. 2017; 2009), который с избытком обеспечивает такую точность измерений по отдельным линиям и группам линий.

## 2. МАЛОМАССИВНЫЕ СВЕРХГИГАНТЫ НА СТАДИИ POST-AGB

Выполнение этой программы началось с изучения популяции сверхгигантов на высоких галактических широтах (Klochko and Panchuk 1989, Klochko et al. 1997b) на Основном звездном спектрографе (Panchuk et al. 2014) и первом эшелле спектрографе высокого разрешения РЫСЬ (Panchuk et al. 1993). С вводом в практику наблюдений спектрографа НЭС программа была распространена на спектроскопию сверхгигантов с большими избытками ИК-потока и оказалась наиболее эффективной как по результатам, так и по наукометрическим критериям. Наличие избытка ИК-потока — это основной критерий отбора звезд-кандидатов, в число которых входят разнообразные типы звезд с высоким темпом потери вещества на предшествующих и текущей стадиях эволюции. Подавляющая доля изученных нами звезд — это звезды на асимптотической ветви гигантов (далее AGB), их потомки — post-AGB-звезды, быстро эволюционирующие к стадии планетарной туманности (PN) и по этой причине называемые также протопланетарными туманностями (PPN). Этот тип звезд интересен прежде всего при поиске эволюционных изменений химического состава звезд, прошедших стадию AGB и третье перемешивание вещества.

Здесь отметим лишь самые значительные результаты. Это прежде всего обнаружение избытков тяжелых металлов *s*-процесса в атмосферах у семи одиночных post-AGB-звезд (Klochko 1997; 2019), что эмпирически подтвердило выводы теории эволюции звезд данного типа. В спектрах трех из этих же звезд впервые обнаружен новый феномен — расщепление сильных абсорбций металлов, что указывает на вынос тяжелых металлов *s*-процесса в околозвездные оболочки (Klochko and Panchuk 2016). На рис. 1 представлена отличная иллюстрация этого эффекта — переменный профиль абсорбции Ba II  $\lambda 4934 \text{ \AA}$  в спектрах post-AGB-сверхгиганта V5112 Sgr. Согласно данным из статьи Klochko (2013), две коротковолновые компоненты формируются в двух различных слоях



**Рис. 1.** Профиль абсорбции Ba II  $\lambda 4934 \text{ \AA}$  в спектрах V5112 Sgr, полученных в разные даты: тонкая сплошная линия — 2 августа 2012 г., жирная сплошная — 13 июня 2011 г., красная — 14 августа 2006 г., синяя — 7 июля 2001 г. Вертикальной штриховой линией показана системная скорость  $V_{\text{sys}} = 13 \text{ км с}^{-1}$ , оболочечные компоненты указаны стрелками.

структурированной оболочки звезды, расширяющихся со скоростями  $V_r = 20$  и  $30 \text{ км с}^{-1}$  относительно системной скорости.

Расщепление сильных абсорбций наблюдается в оптических спектрах избранных post-AGB-звезд с C-rich-оболочками и атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами *s*-процесса. Расщепление максимально у ионов Ba II, линии которого могут быть расщеплены на 2–3 компоненты. Привлечение данных ИК- и радиоспектроскопии показало, что отдельные компоненты расщепленных абсорбций формируются в структурированных околозвездных оболочках. Таким образом, мы наблюдаем вынос в оболочку тяжелых металлов, синтезированных в ходе предшествующей эволюции звезды. Тип профилей сильных абсорбций (расщепление или асимметрия, количество компонент) связан с морфологией оболочки, а также с ее кинематическими и химическими свойствами.

Из-за разнообразия типов звезд с ИК-избытками спектроскопия этих объектов является многосторонней задачей. Помимо выявления особенностей химического состава и уяснения роли сверхгигантов в обогащении межзвездной среды свежесинтезированными элементами, этапы исследо-

вания включают фиксацию стадии эволюции изучаемых объектов, а также анализ спектральных проявлений кинематических процессов в их протяженных, зачастую нестабильных, атмосферах и в газопылевых оболочках. Изучение нестабильности спектров и кинематического состояния атмосфер для избранных звезд требует проведение спектрального мониторинга.

Стартовавшая с обнаружения избытков элементов, синтезируемых в *s*-процессе, программа была расширена в область кинематики атмосфер и оболочек (Klochkova 2014, Klochkova and Chentsov 2007), построения атласов спектров (Chentsov et al. 1999, Klochkova et al. 2007) и спектрополяриметрии избранных объектов (Klochkova et al. 2004). С вводом в эксплуатацию спектрографа НЭС открылась возможность исследовать околозвездные оболочки, наблюдая как вращательную структуру молекулярных спектров (в эмиссии и абсорбции, см. рис. 7 в публикации Panchuk et al. (2009)), так и узкие компоненты резонансных линий на рис. 1).

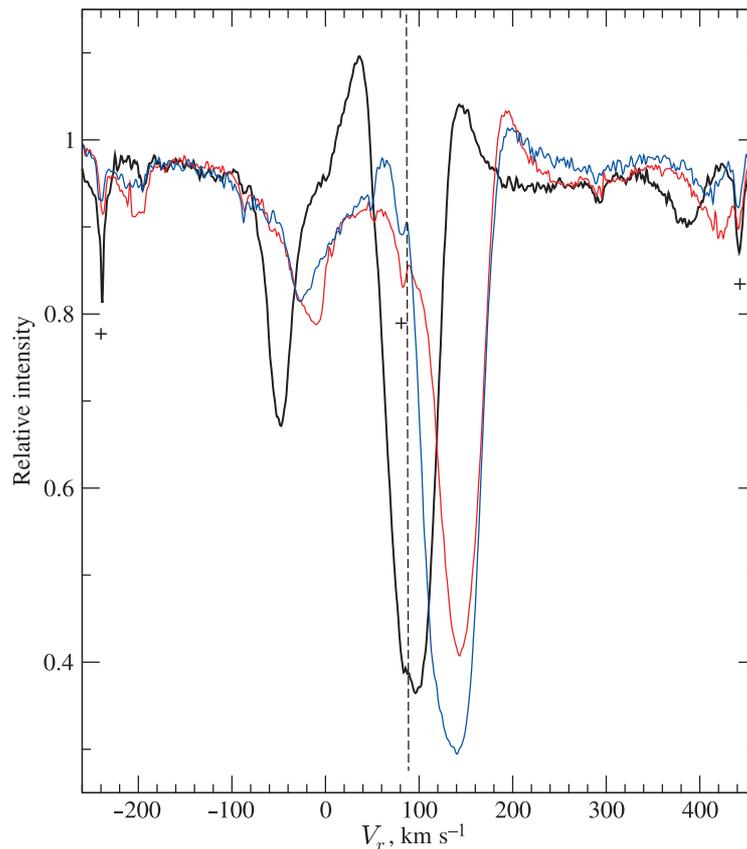
Продолжительный мониторинг выявил монотонные изменения спектра у нескольких объектов и позволил фиксировать их эволюционный статус (см., например, Klochkova et al. (2016; 2002)). Статус некоторых объектов остается неопределенным; примером может служить вспыхнувшая в 2002 г. пекулярная переменная V838 Mon. Параметры и химический состав ее атмосферы были определены Kirper et al. (2004) по спектрам БТА+НЭС. Однако изучение природы объекта и причины вспышки продолжается уже третье десятилетие, сводка результатов опубликована Kamiński et al. (2021).

Спектрограф НЭС был использован для определения фундаментальных параметров и детального химического состава атмосфер звезд нескольких редких типов. К примеру, изучены спектры сверхгигантов с экстремальным дефицитом водорода в составе двойных систем с общей оболочкой. В настоящее время имеются сведения только о четырех тесных двойных системах с большим дефицитом водорода (HdBs), которые считаются предшественниками сверхновых SN Ia. Удивителен тот факт, что все четыре объекта имеют очень близкие эффективные температуры  $T_{\text{eff}} \approx 10\,000$  К. Наиболее известен сверхгигант  $\nu$  Sgr (Sp = A 2Ia), основными особенностями которого являются сильная и переменная эмиссия в H $\alpha$  и большой избыток ИК-потока. С использованием только спектральных критериев Kirper and Klochkova (2012) определили эффективную температуру  $T_{\text{eff}} = 12\,300$  К, ускорение силы тяжести  $\lg g = 2.5$ , микротурбулентную скорость  $\xi_t = 9.5$  км с<sup>-1</sup>. Содержание водорода составляет H/He =  $3 \times 10^{-5}$  при небольшом дефиците железа [Fe/H] = -0.8

и измененном содержании CNO-элементов. Выявлен также значительный избыток тяжелых металлов [s/Fe] = +0.7. В спектре отождествлены множество разрешенных и запрещенных эмиссий, соответствующих низковозбужденным переходам атомов и ионов металлов. Профили типа P Cyg указывают на существование в системе вращающегося аккрецирующего диска. Близкие результаты Kirper and Klochkova (2008) получили для родственной системы — полуправильной переменной KS Per.

Одним из важных достоинств спектрографа НЭС является его хорошая чувствительность в наземном ультрафиолетовом диапазоне в сочетании с надлежащей матрицей ПЗС. Эта область спектра важна для выполнения спектроскопии ряда специфических программ. Примером может служить спектроскопия звезд с низкой металличностью, поскольку спектральные детали, необходимые для выполнения анализа особенностей их атмосфер, доступны именно в коротковолновой области спектра. По результатам спектральных наблюдений, выполненных со спектрографом НЭС в диапазоне длин волн 3550–5100 Å для 14 малометаллических G–K-звезд с большими пространственными скоростями, методом моделей атмосфер определены фундаментальные параметры и атмосферные содержания свыше 20 химических элементов, включая тяжелые металлы *s*- и *r*-процессов от Sr до Dy (Klochkova et al. 2011). Для ряда элементов расчет содержаний выполнен с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия в заселенности атомных уровней. Для шести звезд методом синтетического спектра определено отношение содержания долгоживущего радиоактивного элемента Th к содержанию Eu — элемента *r*-процесса. На основании полученных кинематических параметров и химического состава для каждой изученной звезды определена принадлежность к разным типам населений Галактики.

На основании наблюдений в этой плохо изученной коротковолновой области длин волн, вплоть до 3055 Å, изготовлен атлас спектров высокого отношения *S/N* и высокого спектрального разрешения (Chentsov et al. 2011). Спектры хорошо изученных звезд близкой температуры ( $\beta$  Ori,  $\alpha$  Lyr и  $\alpha$  Cyg) сопоставлены со спектром малометаллического A-сверхгиганта KS Per, атмосфера которого обеднена водородом. Высокие спектральное разрешение и отношение *S/N* делают актуальным детальное описание спектров даже стандартных звезд в области наземного ультрафиолета (300–380 нм), которая из-за насыщенности линиями является более информативной, чем видимый диапазон, особенно для горячих звезд. На рис. 2 в статье Chentsov et al. (2011) представлен один



**Рис. 2.** Переменный профиль  $H\alpha$  в спектрах желтого гипергиганта HD 179821, полученных в разные даты: 24 сентября 2010 г. — синяя линия, 30 мая 2013 г. — черная, 9 октября 2013 г. — красная. Вертикальной штриховой линией указана системная скорость  $V_{\text{sys}} = 86 \text{ km s}^{-1}$  из Likkel et al. (1987). Крестиками указаны теллурические абсорбции.

из самых коротковолновых фрагментов этого спектрального атласа,  $\Delta\lambda 3100\text{--}3150 \text{ \AA}$ .

По спектрам в области длин волн  $3550\text{--}5000 \text{ \AA}$  был также составлен атлас и для нескольких звезд с низкой металличностью,  $-3.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.6$  (Klochkova et al. 2006). Авторы данной статьи использовали эти спектры для расчета содержаний большого набора химических элементов в атмосферах этой выборки малометаллических звезд.

### 3. МАССИВНЫЕ ЗВЕЗДЫ НА ДАЛЕКИХ СТАДИЯХ ЭВОЛЮЦИИ

Исследование звезд высокой светимости затруднено принципиальным обстоятельством — по спектру, формирующемуся в нестационарной атмосфере, невозможно определить скорость центра звезды. Если при исследовании звезд post-AGB для фиксации системной скорости удастся использовать результаты спектроскопии оболочек в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах,

то при исследовании массивных сверхгигантов основным обстоятельством, способствующим определению скорости центра звезды, является принадлежность к звездной группировке. Примером является исследование спектра LBV-кандидата в ассоциации Cyg OB 2 (Klochkova and Chentsov 2004). В подобных случаях необходимо дополнительно измерить лучевые скорости нескольких слабых звезд-членов ассоциации или рассеянного скопления, чтобы определить среднюю лучевую скорость звездной группировки, и задача оценки скорости центра звезды высокой светимости становится достаточно трудоемкой (Chentsov et al. 2013).

Для желтых гипергигантов возможно измерение скорости по молекулам CO, OH. К примеру, системная скорость для гипергиганта V1302 Aql (центральная звезда ИК-источника IRC + 10420) надежно определена Oudmaijer et al. (1996) по нескольким вращательным полосам молекулы CO. Спектроскопия высокого разрешения в оптическом диапазоне дает возможность измерения положений эмиссий, формирующихся в околосвезд-

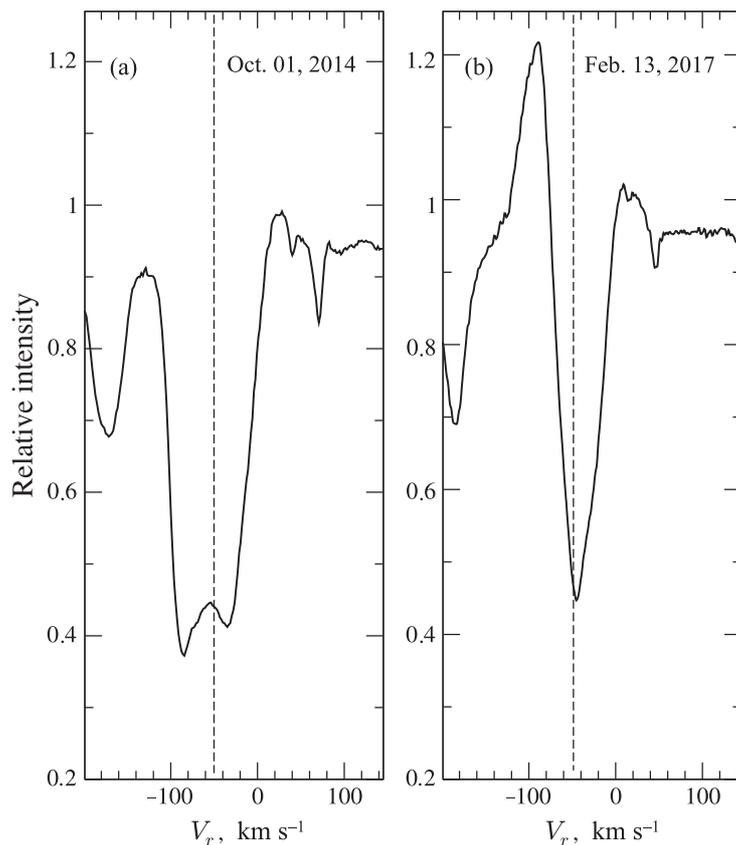


Рис. 3. Профиль  $H\alpha$  в спектрах  $\rho$  Cas: (a) — после вспышки 2013 г., (b) — после максимума блеска в 2017 г.

ной газовой среде, и фиксирования таким образом с высокой точностью скорости центра масс в системе «гипергигант + оболочка» (например, для V1302 Aql (Klochkova et al. 2002), для VES 723 (Miroshnichenko et al. 2021a)). Результаты многолетнего мониторинга желтых гипергигантов северной небесной полусферы суммированы в обзоре Klochkova (2019). По однородным данным спектроскопии с высоким спектральным разрешением определены фундаментальные параметры звезд. ИК-триплет кислорода  $O I \lambda 7773 \text{ \AA}$  с экстремальными значениями эквивалентной ширины послужил критерием светимости: у рассматриваемых звезд среднее значение  $\lg L/L_{\odot} = 5.43 \pm 0.14$ . По совокупности данных детальных позиционных измерений сделана оценка скорости расширения околозвездных оболочек в интервале  $11\text{--}40 \text{ км с}^{-1}$ , по слабым абсорбциям для четырех объектов определена амплитуда пульсаций в узком интервале значений  $\Delta V_r = 7\text{--}11 \text{ км с}^{-1}$ .

В целом продемонстрировано разнообразие особенностей в спектрах звезд предельно высокой светимости, компактно расположенных в верхней части диаграммы Герцшпрунга–Рессела, а именно: наличие (или отсутствие) разрешенных и

запрещенных эмиссий, эмиссионных компонентов сложных профилей, особенности поведения во времени спектральных деталей различной природы. Показана эффективность мониторинга с высоким спектральным разрешением для выявления переменности динамического состояния на разных глубинах протяженной атмосферы и околозвездной оболочки гипергигантов. В частности, доказана достоверность статуса желтого гипергиганта для V1427 Aql и отсутствие компаньона в системе V509 Cas.

Обобщение результатов наблюдений гипергиганта V1302 Aql в 1992–2014 гг. привело к выводу о том, что его эффективная температура быстро росла в течение XX века — со скоростью около  $120 \text{ К}$  в год. Наши наблюдения 2001–2014 гг. указывают на вход гипергиганта в фазу прекращения роста его температуры и приближение объекта на диаграмме Герцшпрунга–Рессела к границе Желтого Войда.

Упомянем также спектроскопию нескольких цефеид (Usenko et al. 2013; 2005). Результаты для Полярной особенно важны, поскольку у входящей в эту близкую кратную систему цефеиды было детально изучено поведение со временем параметров атмосферы (Usenko et al. 2005). Позже

Usenko and Klochkova (2008) впервые определили основные параметры компаньона В. Turner et al. (2013), базируясь на обширном материале спектрального мониторинга Полярной, проведенного В. Г. Клочковой и М. В. Юшкиным со спектрографом НЭС, исследовали изменение ее светимости и эффективной температуры. Получены выводы о фундаментальной моде пульсаций и о первом пересечении Полярной полосы неустойчивости.

#### 4. ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ГИПЕРГИГАНТА $\rho$ CAS ВСЛЕДСТВИЕ ВЫБРОСА ОБОЛОЧКИ В 2013 г.

Спектральный мониторинг желтого гипергиганта  $\rho$  Cas на БТА+НЭС после выброса вещества в 2013 г. выявил изменения  $H\alpha$ : от профиля с раздвоенным ядром в 2014 г. до обратного P Cug-профиля в начале 2017 г. (см рис. 3) и вновь к профилю с раздвоенным сильно смещенным в длинноволновую область ядром, что указывает на быстрое падение вещества. В 2017 г. впервые зарегистрировано расщепление профилей низковозбужденных абсорбций на три компонента (Klochkova et al. 2018). Сделан вывод об отсутствии корреляции в эволюции профилей  $H\alpha$  и расщепленных абсорбций. Переменность типа пульсаций с амплитудой около  $10 \text{ км с}^{-1}$  присуща лишь симметричным абсорбциям слабой и умеренной интенсивности. В длинноволновой области спектра 2013 г. обнаружены оболочечные эмиссии, интенсивность которых в 2017 г. снизилась до вплоть исчезновения. Оболочечные эмиссии металлов постоянно присутствуют в крыльях H и K линий Ca II. Мониторинг  $\rho$  Cas позволил зафиксировать динамическую неустойчивость верхних слоев атмосферы звезды и впервые обнаружить расслоение ее газовой оболочки в ходе эпизода сброса вещества в 2017 г. (Klochkova et al. 2018).

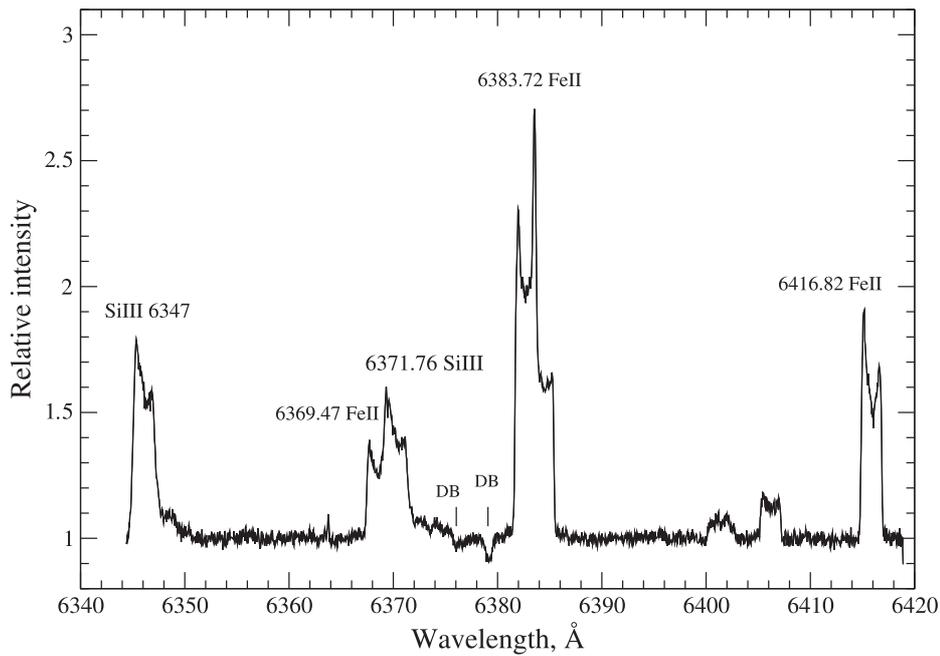
Выброс 2013 г. сопровождался снижением температуры  $\rho$  Cas примерно на 3000 K и падением яркости на  $0^{\text{m}}6$  (Kraus et al. 2019). Во время выброса в спектре появились полосы молекулы TiO, а также атмосферные линии металлов низкого возбуждения, характерные для более позднего спектрального типа. Анализ параметров эмиссий, которые появляются в фазах максимальной яркости, показал, что они изменяются синхронно с излучением в сильных запрещенных эмиссиях [Ca II]. В связи с последними выбросами можно предположить, что интервал времени между такими событиями уменьшается. Это может означать, что  $\rho$  Cas «готовится» к крупному выбросу массы с последующим пересечением звездой границы Желтого Войда. Очевидна актуальность систематического спектрального мониторинга  $\rho$  Cas.

#### 5. ГОРЯЧИЕ СВЕРХГИГАНТЫ С ФЕНОМЕНОМ V[e] В СПЕКТРАХ

Как уже было отмечено выше, основным критерием отбора кандидатов в семейство звезд высокой светимости с ИК-избытками служит аномальное распределение энергии в спектре. За счет столь широко охватывающего критерия в выборку зачастую попадали звезды неясного эволюционного статуса. К примеру, V1302 Aql и 3 Pup до начала их детального изучения рассматривались как post-AGB-звезды, эволюционирующие к стадии планетарной туманности. Лишь изучение химического состава атмосфер V1302 Aql (Klochkova et al. 1997a) и 3 Pup (Plets et al. 1995) позволило отнести обе звезды к массивным сверхгигантам на различных стадиях эволюции. Теперь V1302 Aql — самый надежный представитель семейства желтых гипергигантов, а горячая звезда 3 Pup отнесена к объектам с феноменом V[e].

V[e]-феномен заключается в наличии в спектре звезды совокупности ряда пекулярных деталей: сильных эмиссий H I и He I, а также эмиссий разрешенных линий ионов металлов и низковозбужденных запрещенных линий. Вторым существенным признаком звезд с феноменом V[e] является большой избыток ИК-потока, обусловленный присутствием вокруг звезды горячей пыли. Однако звезды, отвечающие этим двум основным признакам, составляют группу весьма разнородных объектов. В спектре 3 Pup комплексные профили линий переменны со временем (Chentsov et al. 2010): меняются величина и знак асимметрии абсорбций и отношения интенсивностей синей и красной эмиссий. Все запрещенные эмиссии в зарегистрированной области спектра имеют одинаковые по форме и ширине профили и в пределах ошибок показывают одну и ту же лучевую скорость, что позволяет принять среднее значение скорости по запрещенным эмиссиям в качестве системной:  $V_{\text{sys}} = 28.5 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}$ . По слабым фотосферным абсорбциям уверенно фиксируется изменение скорости (до  $7 \text{ км с}^{-1}$ ) от даты к дате.

По основным параметрам 3 Pup близка к звезде MWC 17 с феноменом V[e] в спектре. По данным многократных наблюдений, проведенных на 6-м телескопе БТА со спектрографом НЭС, детально изучены особенности оптического спектра звезды MWC 17 (Klochkova and Chentsov 2016). В интервале длин волн 4050–6750 Å отождествлены многочисленные разрешенные и запрещенные эмиссии, а также межзвездные линии Na I и DIBs. В качестве системной скорости  $V_{\text{sys}}$  также принята скорость для запрещенных эмиссий. Однако сопоставление полученных нами для MWC 17 данных



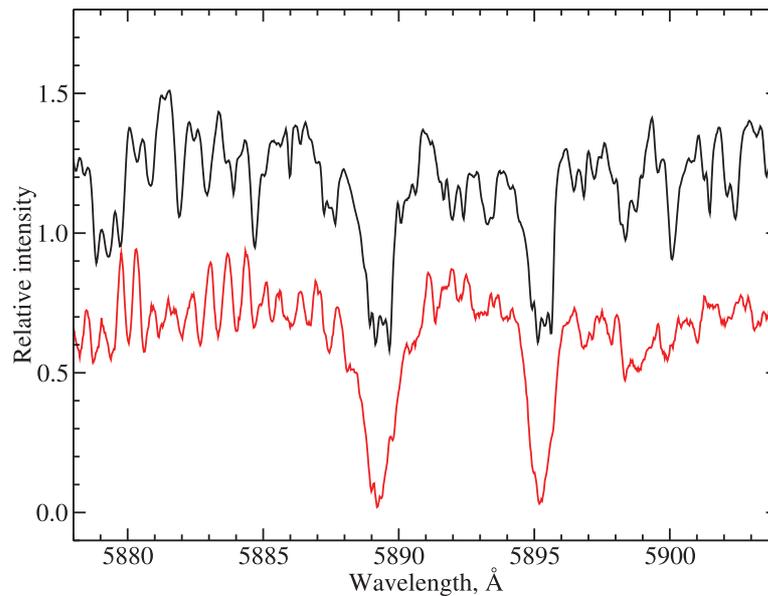
**Рис. 4.** Фрагмент спектра CI Cam, полученного на БТА + НЭС 6 декабря 2019 г. Указано отождествление основных деталей.

с опубликованными более ранними позволяет сделать вывод об отсутствии значительной переменности в спектре MWC 17 в отличие от 3 Pup.

Среди звезд с В[е]-феноменом особенно сложны спектры пекулярных В-сверхгигантов в составе двойных систем. Для примера упомянем объект MWC 84 = CI Cam, спектроскопии которого на БТА + НЭС уделено значительное время. Объект уникален вследствие присутствия компаньона и околозвездного газового диска. Barsukova et al. (2006) провели анализ результатов спектрального мониторинга CI Cam и показали, что компаньоном является белый карлик. Miroschnichenko et al. (2002) была обнаружена сложная структура разрешенных и запрещенных эмиссий, что указывает на стратификацию среды их формирования. Miroschnichenko et al. (2002) пришли к выводу о формировании этих спектральных деталей в наклонном околозвездном диске, видимом с ребра. Для иллюстрации этой особенности на рис. 4 приводим фрагмент спектра CI Cam. Эмиссии ионов Si III и Fe II структурированы. На этом фрагменте отмечены также межзвездные полосы DIB 6376.32 и 6379.32 Å. Подчеркнем также, что все компоненты ИК-триплета кислорода OI 7773 Å в этом спектре CI Cam — достаточно сильные и структурированные эмиссии.

## 6. ЗВЕЗДЫ ТИПА МИРЫ КИТА

К миридам относятся маломассивные холодные звезды (менее  $1-3 M_{\odot}$ ), находящиеся на стадии AGB. Спектроскопические наблюдения на Основном звездном спектрографе (Panchuk et al. 2014), выполненные на БТА еще в конце 1970-х годов, в сочетании с расчетами синтетических спектров молекулы окиси титана (Panchuk 1978c) позволили выдвинуть гипотезу о формировании оптического спектра мирид не в атмосфере, а преимущественно в холодной околозвездной оболочке (Panchuk 1978b). С помощью этой гипотезы можно объяснить изменения амплитуд визуального блеска от периода к периоду, не повторяющиеся от периода к периоду вариации амплитуд лучевых скоростей, особенности поведения эмиссионных линий водорода и металлов (Panchuk 1978a). В новой (выполняемой на НЭС) программе спектроскопии мирид предпочтение отдаем звездам класса S, где отношение числа ядер углерода и кислорода близко к единице. В атмосферах и оболочках этих объектов практически все атомы С и О связаны в молекулах СО. Молекула СО имеет максимальный потенциал диссоциации, поэтому вблизи значения  $O/C \approx 1$  для формирования оксидов недостает кислорода, а для формирования углеродосодержащих молекул недостает свободного углерода. Итак, в атмосферах мирид класса S существенно меньше



**Рис. 5.** Область спектра R Cam в районе резонансного дублета нейтрального натрия для двух фаз кривой изменения блеска. Верхний спектр получен вблизи максимума, нижний — вблизи минимума визуального блеска звезды.

молекул TiO, чем у мирид класса M, и практически не наблюдаются молекулы C<sub>2</sub>, CN, характерные для мирид класса C. Поэтому атмосферы S-звезд являются наиболее прозрачными для данного интервала эффективных температур, что позволяет наблюдать динамику спектральных деталей атмосферы и оболочки в широком интервале фаз кривой изменения блеска. В самых непрозрачных участках атмосферы при определенных условиях удастся увидеть спектр околозвездной оболочки. На рис. 5 приведена область спектра в районе резонансного дублета нейтрального натрия для двух фаз кривой изменения блеска мириды R Cam (ее спектральный класс меняется от S2.8e до S8.7e).

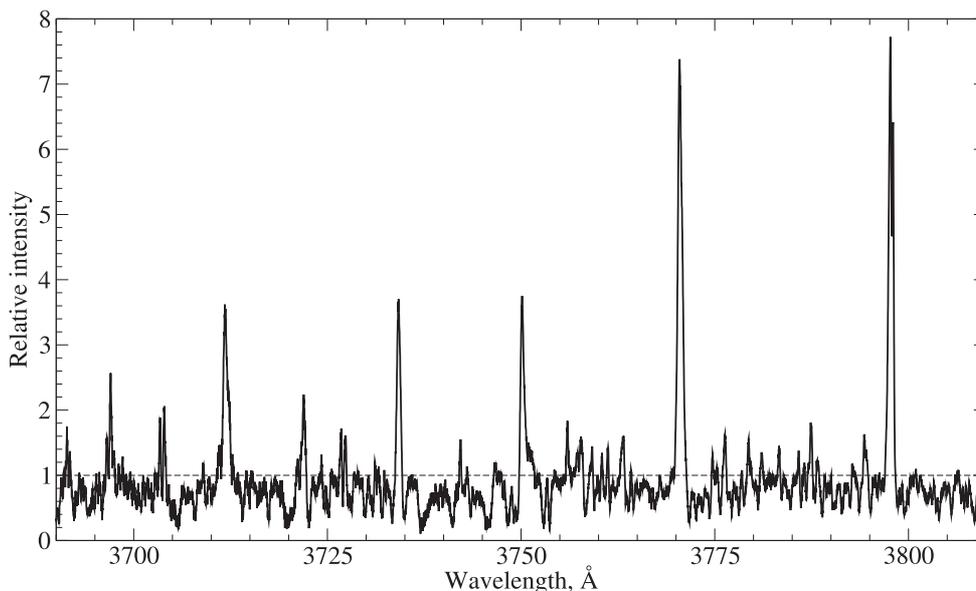
Высокое спектральное разрешение позволяет измерить ширины молекулярных линий (или их бленд) в колебательно-вращательной полосе (2; 1) электронной системы  $\gamma$  молекулы TiO (рис. 5, нижний спектр, слева). Вблизи максимума блеска в ядрах резонансного дублета Na I обнаружены узкие детали, повторяющиеся в линиях D1 и D2, (то есть гарантированно принадлежащие атомам натрия). Ширина этих деталей уступает ширине линий молекулярного спектра. Все спектрограммы имеют хорошее накопление сигнала, так что детали в ядрах глубоких абсорбций Na I реальны. Мы считаем, что в максимуме блеска, когда молекулярное поглощение не искажает структуру ядер дублета Na I, у мирид спектрального класса S видны детали нескольких оболочек, отслоившихся от звезды на стадии AGB. Структура ядер линий резонансного дублета натрия у мирид обнаружена впервые.

В области наземного ультрафиолета мирид спектрального класса S, где молекулярное поглощение незначительно, наблюдаем эмиссионные линии бальмеровской серии водорода, профили которых изрезаны абсорбционными линиями металлов (рис. 6). Искажение эмиссионных линий позволяет оценить параметры поглощающего слоя, находящегося над областью формирования эмиссии.

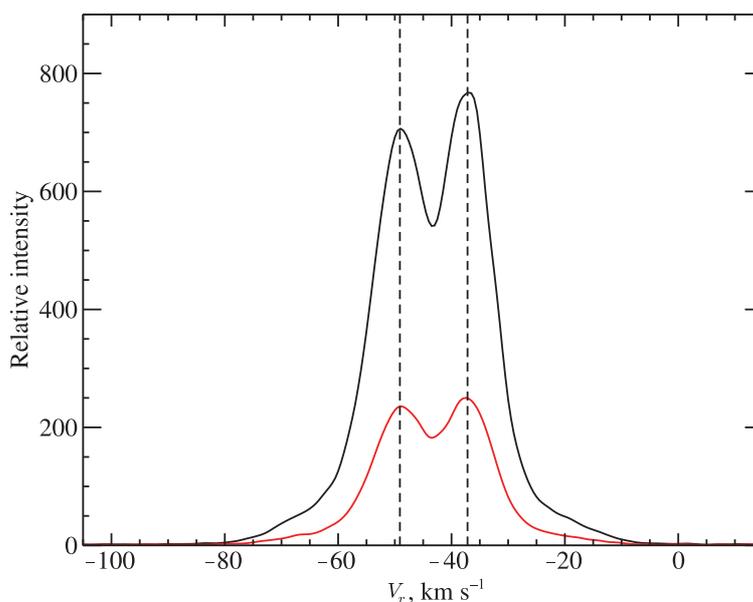
Изучение несинхронизированных вариаций интенсивности в различных линиях бальмеровской серии водорода позволяет разделить три эффекта: подавление эмиссий молекулярным поглощением в оболочке, подавление в абсорбционных линиях металлов и собственно вариации интенсивностей эмиссий. Заметим, что полуширина неискаженных эмиссий (более 1 Å) в несколько раз превышает как величину теплового доплеровского уширения, так и уширение, возникающее в области высвечивания за фронтом сферически симметричной ударной волны. Таким образом, широкий одновременно регистрируемый диапазон спектра и высокое спектральное разрешение НЭС открывают возможность исследования процессов несимметричной потери вещества и у звезд, находящихся на стадии AGB.

## 7. МОЛОДЫЕ ПЛАНЕТАРНЫЕ ТУМАННОСТИ

Быстрый переход от стадии красного гиганта (RG) к стадии планетарной туманности (PN) (длительность перехода короче  $10^4$  лет, по Ham and



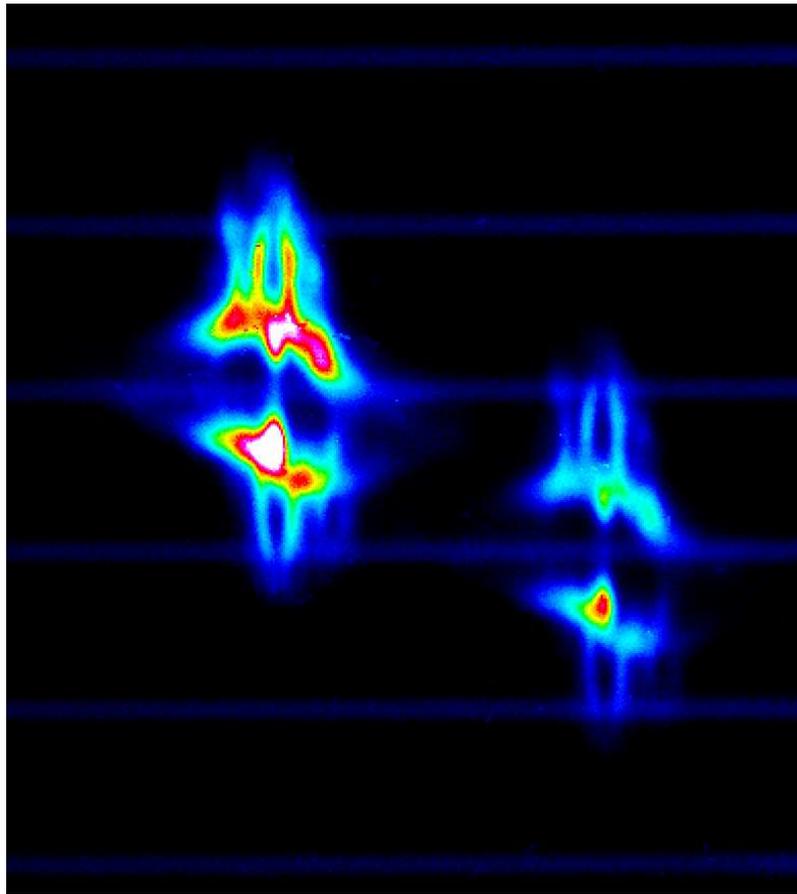
**Рис. 6.** Эмиссии бальмеровской серии водорода (от H 16  $\lambda$  3703.9 Å, до H 10  $\lambda$  3797.9 Å), а также многочисленные эмиссии и абсорбции металлов на фрагменте спектра  $\chi$  Лебеда — мириды спектрального класса S.



**Рис. 7.** Профили боуэзовских линий O III в спектре Vу 1-1, полученном со спектрографом НЭС. Красным обозначен профиль линии O III  $\lambda$  4559 Å, черным — O III  $\lambda$  5007 Å. Половина расстояния между двумя штриховыми вертикалями соответствует скорости расширения.

Schwarzschild (1975)), затрудняет поиск и исследование немногочисленных объектов, находящихся на стадии post-AGB. Высказанное Kwok (1982) предположение, что некоторые признаки потери вещества у RG могут сохраниться и на стадии молодых (компактных) PN, позже подтвердилось. Остатки вещества, потерянного на стадиях AGB и post-AGB, имеют массы, сравнимые с массами

PN, и являются важным фактором в формировании наблюдаемой структуры PN. Как и спектроскопия оболочек мирид, исследования кинематической структуры PN помогут уточнить картину потери вещества на фазе быстрого перехода маломассивных звезд высокой светимости через провал диаграммы H-R. Здесь первоочередной задачей считаем повышение точности определений скоро-



**Рис. 8.** Доплеровское изображение пары боуэновских линий O III ( $\lambda = 5007 \text{ \AA}$ , слева сверху, и  $\lambda = 4559 \text{ \AA}$ , справа внизу) в спектре NGC 2392. Слабые горизонтальные полоски — фрагменты непрерывного спектра центральной звезды. По ординате — спектры деталей изображения, проецирующихся на различные участки по высоте щели НЭС, по абсциссе — раздвоение (фрагментирование) линий вследствие разности скоростей по лучу зрения.

сти кинематического расширения фрагментов PN, наблюдаемых в линиях различных элементов и их ионов, с последующей оценкой (снизу) динамического возраста туманности. При этом может быть реализовано основное преимущество НЭС перед большинством спектрографов, использованных при составлении каталогов скоростей расширения PN (Sabbadin 1984, Weinberger 1989). На рис. 7 приведены профили боуэновских линий O III в спектре Vу 1-1, полученном со спектрографом НЭС. Красным обозначен профиль линии O III  $\lambda 4559 \text{ \AA}$ , черным — O III  $\lambda 5007 \text{ \AA}$ . Половина расстояния между двумя штриховыми вертикалями на этом рисунке соответствует скорости расширения. Точность измерения доплеровской разности компонент  $\Delta V_r$  составляет  $150 \text{ м с}^{-1}$ .

Преимуществом эшелле-спектрографа НЭС является возможность наблюдений в режиме «высокая щель», что позволяет сравнивать скорости расширения, измеренные по линиям различных атомов и ионов для разных позиционных углов положения щели на изображении PN и разных

точек по высоте щели. Для иллюстрации на рис. 8 приведено доплеровское изображение пары боуэновских линий O III ( $\lambda = 5007 \text{ \AA}$  — слева сверху и  $\lambda = 4559 \text{ \AA}$  — справа внизу) в спектре NGC 2392 — природной лаборатории по изучению формирования джетов. Слабые горизонтальные полоски — фрагменты непрерывного спектра центральной звезды. По ординате — спектры деталей изображения, проецирующихся на различные участки по высоте щели НЭС, по абсциссе — раздвоение (фрагментирование) линий вследствие различия скоростей по лучу зрения.

Оснащение НЭС приемником форматом  $4.6 \text{ К} \times 2 \text{ К}$  позволяет регистрировать (за две экспозиции) спектр PN от наземного ультрафиолета до ближнего ИК-диапазона. Это позволяет исследовать линии, формирующиеся в комбинациях различных процессов (возбуждение, ионизация, столкновения, рекомбинация, флуоресценция).

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструктивные особенности и параметры НЭС (постоянная локализация на телескопе, высокое спектральное разрешение, широкий диапазон спектра, возможность наблюдения протяженных объектов) являются как фундаментом для выполнения разнообразных спектроскопических исследований, так и стимулом дальнейшего развития спектрографа, включающего первые шаги по адаптивной оптике (Klochkova et al. 2020). Наиболее продуктивными оказались программы, сочетающие элементы обзора с продолжительным мониторингом.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа В. Г. Клочковой выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 20-19-00597. В. Е. Панчук признателен правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (№ 13.1902.21.0039). Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение № 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. A. Barsukova, N. V. Borisov, A. N. Burenkov, et al., *Astronomy Reports* **50** (8), 664 (2006).
2. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, T. Kipper, et al., *Astrophysical Bulletin* **66** (4), 466 (2011).
3. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and A. S. Miroshnichenko, *Astrophysical Bulletin* **65** (2), 150 (2010).
4. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, et al., *Astronomy Reports* **57** (7), 527 (2013).
5. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and N. S. Tavganskaya, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **48**, 25 (1999).
6. V. N. Erokhin and S. P. Plyaskin, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **17**, 40 (1983).
7. E. B. Gazhur, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Soviet Astron. Lett.* **16**, 202 (1990).
8. R. Harm and M. Schwarzschild, *Astrophys. J.* **200**, 324 (1975).
9. T. Kamiński, R. Tylenda, A. Kiljan, et al., *Astron. and Astrophys.* **655**, id. A32 (2021).
10. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **17**, 195 (2008).
11. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **21**, 219 (2012).
12. T. Kipper, V. G. Klochkova, K. Annuk, et al., *Astron. and Astrophys.* **416**, 1107 (2004).
13. V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 5 (1997).
14. V. G. Klochkova, *Astronomy Letters* **39** (11), 765 (2013).
15. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 279 (2014).
16. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 475 (2019).
17. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **48** (12), 1005 (2004).
18. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **71** (1), 33 (2016).
19. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, A. S. Miroshnichenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459** (4), 4183 (2016).
20. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **292** (1), 19 (1997a).
21. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., *Baltic Astronomy* **16**, 155 (2007).
22. V. G. Klochkova and Y. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **51** (12), 994 (2007).
23. V. G. Klochkova, T. V. Mishenina, V. E. Panchuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **66** (1), 28 (2011).
24. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Soviet Astron. Lett.* **15**, 264 (1989).
25. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 39 (1998).
26. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **60** (3), 344 (2016).
27. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and E. L. Chentsov, *Astron. and Astrophys.* **323**, 789 (1997b).
28. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and V. P. Ryadchenko, *Soviet Astron. Lett.* **17**, 274 (1991).
29. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavganskaya, *Astronomy Reports* **62** (9), 623 (2018).
30. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and A. S. Miroshnichenko, *Astronomy Reports* **48** (4), 288 (2004).
31. V. G. Klochkova, Y. V. Sheldakova, V. V. Vlasyuk, and A. V. Kudryashov, *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 468 (2020).
32. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **46** (2), 139 (2002).
33. V. G. Klochkova, G. Zhao, S. V. Ermakov, and V. E. Panchuk, *Chinese J. Astron. Astrophys.* **6** (5), 579 (2006).
34. M. Kraus, I. Kolka, A. Aret, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (3), 3792 (2019).
35. S. Kwok, *Astrophys. J.* **258**, 280 (1982).
36. L. Likkel, A. Omont, M. Morris, and T. Forveille, *Astron. and Astrophys.* **173**, L11 (1987).
37. A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, K. S. Bjorkman, and V. E. Panchuk, *Astron. and Astrophys.* **390**, 627 (2002).

38. A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (1), 879 (2021).
39. D. N. Monin and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **28** (12), 847 (2002).
40. R. D. Oudmaijer, M. A. T. Groenewegen, H. E. Matthews, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **280** (4), 1062 (1996).
41. V. E. Panchuk, *Soviet Astron. Lett.* **4**, 201 (1978a).
42. V. E. Panchuk, *Soviet Astron. Lett.* **4**, 170 (1978b).
43. V. E. Panchuk, *Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **22**, 5 (1978c).
44. V. E. Panchuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 65 (1998).
45. V. E. Panchuk and V. L. Afanas'ev, *Astrophysical Bulletin* **66** (2), 233 (2011).
46. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014).
47. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, G. A. Galazutdinov, et al., *Astronomy Letters* **19** (6), 431 (1993).
48. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61** (9), 820 (2017).
49. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Naidenov, *J. Optical Technology* **76** (2), 87 (2009).
50. H. Plets, C. Waelkens, and N. R. Trams, *Astron. and Astrophys.* **293**, 363 (1995).
51. F. Sabbadin, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **58**, 273 (1984).
52. D. G. Turner, V. V. Kovtyukh, I. A. Usenko, and N. I. Gorlova, *Astrophys. J.* **762** (1), L8 (2013).
53. I. A. Usenko and V. G. Klochkova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **387** (1), L1 (2008).
54. I. A. Usenko, V. G. Klochkova, and N. S. Tavoizhanskaya, *Astronomy Letters* **39** (9), 634 (2013).
55. I. A. Usenko, A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **362** (4), 1219 (2005).
56. R. Weinberger, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **78**, 301 (1989).

### Results of Selected Stellar Spectroscopy Programs at the 6-m Telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences Performed with the NES Echelle Spectrograph

V. G. Klochkova<sup>1</sup>, V. E. Panchuk<sup>1</sup>, and M. V. Yushkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

Over the past two decades NES spectrograph attached to the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences was used to perform spectroscopy of stars at advanced stages of evolution spanning a wide range of masses. The studies cover a variety of star types with high mass-loss rates during the preceding and current stages of evolution. All these stars have extended atmospheres and structured circumstellar envelopes produced by strong stellar winds. We have studied luminous blue variables (LBVs) near the Eddington limit; hot supergiants exhibiting B[e] phenomenon, which are very likely intermediate-mass binary systems soon after the fast mass exchange stage; a group of yellow hypergiants, as well as an extensive sample of low-mass post-AGB supergiants. The diverse nature of the types of these stars whose common feature is the presence of an envelope makes the spectroscopy of such objects a comprehensive task. Such studies consist of many etapes, which include not only determining the specifics of the chemical composition and understanding the role of supergiants in the enrichment of the interstellar medium with freshly synthesized elements, but also the determination of the evolutionary stage of the objects considered, as well as search for and analysis of spectroscopic manifestations of kinematic processes in their extended and unstable atmospheres and gas-dust envelopes. We spectroscopically monitored selected objects to study in detail the instability of the kinematic state of the atmospheres of the stars considered. Studies of stars at neighboring evolutionary stages have been initiated. This review reports the most significant observational obtained within the framework of the 1998–2021 programs.

Keywords: *stars: evolution—stars: nucleosynthesis—stars: atmospheres—technique: spectroscopy*