

УДК 524.3

## LBV-КАНДИДАТЫ В ГАЛАКТИКАХ М 31 И М 33. 20 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ: НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2018 О. Н. Шолухова\*, С. Н. Фабрика, А. Ф. Валеев, А. Н. Саркисян

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

Поступила в редакцию 16 июля 2018 года; принята в печать 5 сентября 2018 года

На 6-м телескопе САО РАН с 1997 года проводится программа поиска и исследования кандидатов в LBV (luminous blue variable) в галактиках М 31 и М 33. В статье мы суммируем наши результаты наблюдений за последние 20 лет. За это время были составлены списки кандидатов, проведены фотометрия и спектроскопия около сотни звезд списка. Выполнено детальное исследование и классификация кандидатов в LBV-звезды. Также проводился спектральный и фотометрический мониторинг «bona fide» LBV-звезд в этих галактиках. По результатам были рассчитаны SED (спектральные распределения энергии) LBV и LBV-кандидатов, определены величины межзвездного поглощения, температура и светимость. Нами предложен новый метод подтверждения природы звезд LBV. Он основан на особом свойстве, присущем только LBV-звездам — постоянстве болометрической светимости — за исключением редкой фазы гигантских извержений, зарегистрированных у двух исторических LBV в нашей Галактике и у нескольких десятков внегалактических LBV. С помощью этого метода мы определяем фундаментальные параметры этих звезд: температуру, радиус, светимость, а также межзвездное поглощение. Обсуждаем природу нескольких индивидуальных объектов — обнаруженных нами LBV-звезд в М 33 и классификацию LBV-кандидатов в М 31. Таким образом, в результате наблюдений, проводившихся в течение 20 лет, мы нашли четыре LBV-звезды в М 33, а в М 31 мы подтвердили принадлежность семи объектов к звездам LBV-класса.

Ключевые слова: *звезды: массивные — звезды: переменные: LBV — галактики: индивидуальные: М 31, М 33*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

LBV-звезды — это крайне малочисленный класс молодых массивных звезд; их изучение в нашей Галактике затруднено из-за большого поглощения пылью в плоскости Галактики и недостаточной точности в измерениях расстояний. Поэтому особенно ценны для изучения LBV-звезды в близких галактиках. Они представляют уникальную лабораторию для исследования массивных звезд. Все изучаемые объекты в данных галактиках находятся на одном расстоянии, которое очень хорошо известно. По крайней мере в поглощении и в расстоянии нет больших неопределенностей, которые часто встречаются в объектах нашей Галактики. Увеличение количества изученных LBV и LBV-кандидатов даст возможность их классификации и лучшего понимания эволюционного статуса.

В обзоре [1] к классу LBV было отнесено пять звезд в нашей Галактике и пятнадцать

звезд в галактиках Местной группы. В галактиках М 31 и М 33 авторы выделили по четыре LBV-звезды. В этом же обзоре упоминаются четыре LBV-кандидата в нашей Галактике и один в М 33. Сейчас в галактике М 31 известно 24 кандидата в LBV и в М 33 — 37 кандидатов [2]. В наших работах мы нашли три LBV-звезды в галактике М 33 [3, 4]. В работе [5, 6] были добавлены два LBV-кандидата в М 33 и один в М 31. В нашей работе [7] мы открыли еще две звезды LBV в М 31 (J 004526.62 и J 004051.59). Наши данные по объекту J 004526.62 уже использованы Робертой Хемфри для изучения его спектральной и фотометрической переменности и вошли в ее статью [8]. Объект J 004051.59 имеет неоднозначные характеристики и нуждается в подтверждении его природы как LBV-кандидата [9].

Считается, что эволюция наиболее массивных звезд выглядит так:  $O \rightarrow Of \rightarrow Ofpe \rightarrow Ofpe/WN \rightarrow WNL \rightarrow LBV \rightarrow WNL \rightarrow WNE \rightarrow WC \rightarrow WO$  [10]. При этом странная цепочка  $Ofpe \rightarrow Ofpe/WN \rightarrow WNL$  объектов (их еще

\*E-mail: o1ga@sao.ru

называют «слэш-звезды») сейчас переклассифицируются в звезды типа WN 6–11 (например, Smith et al. [11]). Введение очень поздних WN 9–11-звезд оказалось чрезвычайно полезным, т.к. LBV в своих «горячих фазах» оказались тоже WN 9–11. Характерное время смены фаз LBV — это годы: десятки и сотни лет. Переходы из горячей фазы в холодную и обратно связаны с нестабильностями в ветрах, близких к эддингтоновскому пределу, и это не имеет отношения к эволюционной последовательности LBV → WNL, где мы видим эволюцию более чем десятки тысяч лет. Стало ясно, что звезды LBV и WNLh, особенно те, которые имеют умеренное содержание водорода (WNLh, WNLha, где «L» означает «late»), находятся на промежуточной стадии, связанной с нестабильностями в ветрах (Groh et al. [10]). Спектральные наблюдения проводятся всего несколько десятков лет, поэтому, скорее всего, есть спящие (dormant) LBVs, которые дремлют более чем несколько десятков лет. Принципиально важно искать такие объекты и максимально точно из наблюдений определять их болометрические светимости, поглощение и температуры. Известны две LBV, которые за последние годы показали переходы типа LBV ↔ WNLh. Это AG Car в нашей Галактике (Groh et al. [12]) и исследуемая нами LBV-звезда V 532 в галактике M 33 (Sholukhova et al. [13]). Известен также еще один переход WN 3 → WN 11 (LBV) → WN 4–5, наблюдавшийся в массивной двойной WR-системе HD 5980 в галактике SMC (Koenigsberger et al. [14]). Все эти три объекта имеют большое количество спектральных и фотометрических данных.

Фактически количество LBV-звезд в галактиках местной группы точно определить невозможно, потому что новые наблюдательные данные позволяют по-другому классифицировать LBV-кандидаты. LBV-звезда (кандидат) может быть классифицирована по-разному, например, как B[e]-сверхгигант. В работе [2] LBV-звезды были разделены по типам в зависимости от спектральных особенностей: холодные, горячие и P Cyg. В работе [6] авторы разделяют звезды высокой светимости на шесть типов по спектральным и фотометрическим особенностям: LBV, Fe II-эмиссионные звезды, O/late-WN-звезды, горячие и промежуточные сверхгиганты, теплые гипергиганты. Объяснить эти особенности и взаимные переходы типов между собой позволят дальнейшие спектральные наблюдения и долгосрочный мониторинг этих звезд. Кларк и др. [15] использовали наши данные по звезде V 532 [13] и по открытым нами в M 33 LBV-звездам N 93351, N 45901, N 125093 [3, 4] для классификации LBV и LBV-кандидатов в M 33. Позже Humphreys et al. [5] показали, что N 93351 и N 125093 являются теплыми гипергигантами.

Некоторые LBV-звезды имеют инфракрасный избыток, и поэтому есть надежда, что ИК-диапазон принесет новую информацию о природе этих объектов и их классификации. Oksala et al. [16] и Kraus et al. [17] предложили новый тип классификации LBV-подобных звезд на основе ИК-данных. На диаграмме  $(J - H) - (H - K)$  LBV-звезды и B[e]SGs разделяются на две отдельные группы, поскольку большинство спектроскопически подтвержденных B[e]SGs имеют теплую пылевую оболочку. Число исследованных ими объектов пока недостаточно для надежных количественных критериев, однако это дает возможность для дополнительной классификации LBV-подобных звезд.

## 2. СПИСКИ КАНДИДАТОВ

### 2.1. Galaxy M 33

Первоначально задача ставилась как поиск объектов типа SS 433 в галактике M 33 (Fabrika and Sholukhova [18]). Действительно, как выяснилось недавно, спектр объекта SS 433 в нашей Галактике практически идентичен оптическим спектрам звезд LBV в их горячем состоянии (Fabrika et al. [19]). Все эти звезды очень горячие, линия He II 4686 Å уже, чем водородные линии. Когда линия He II образуется в верхней части фотосферы, она узкая; водородные линии будут более ускоренными, холодными и широкими. Ультраяркие рентгеновские источники (ULX), SS 433, звезды WNLh выглядят как горячие звезды в стадии LBV. Поэтому они являются такими же объектами, что и сверхэддингтоновский аккреционный диск и истечение из горячих звезд LBV. Были составлены первые списки кандидатов в объекты типа SS 433. Одним из критериев подобия SS 433 было превышение блеска в линии H $\alpha$ . Таких объектов было отобрано 19. Отбор осуществлялся на основе глазомерных оценок яркости объектов OB-звезд на H $\alpha$ -изображениях Куртеса и др. [20], полученных на телескопе БТА. Кроме того, были отобраны горячие звезды внутри остатков сверхновых или в радиотуманностях. Дополнительным критерием была переменность блеска OB-звезды. Всего по перечисленным критериям была отобрана 171 горячая звезда из каталога Иванова и др. [21]. Как оказалось, принятым при отборе таких звезд критериям могут удовлетворять также звезды LBV.

Второй список LBV-кандидатов был составлен на основе фотометрии 2332 OB-звезд на оцифрованных H $\alpha$ -изображениях галактики M 33 Куртеса и др. [20]. Получен список 549 голубых звездных объектов с H $\alpha$ -эмиссией (Fabrika et al. [22]). По диаграммам «поток, поверхностная яркость — размер» в линии H $\alpha$  среди них выделены объекты различных морфологических типов: 81 звезда,

154 диффузные туманности, 180 оболочечных туманностей и 117 неразрешенных  $H\alpha$ -источников. Была проведена мультиобъектная спектроскопия 173 голубых звезд из наших списков (Sholukhova et al. [23]), в результате которой было обнаружено, что 57 имеют широкие эмиссионные линии  $H\alpha$ , которые, вероятно, формируются в звездном ветре в оболочке звезды. На основе полученных спектральных данных мы таким образом выделили звезды для последующего исследования. 19 звезд были названы кандидатами в объекты LBV (два из них наиболее надежные LBV, один — [Be]-сверхгигант).

В 2010 г. нами был создан новый список массивных звезд. Это были кандидаты в звезды на критических стадиях эволюции в галактике М33 (Valeev et al. [24]). Этот список звезд с  $H\alpha$ -эмиссией включает 185 звезд до 18.5 зв. величины в  $V$  с  $(B - V) < 0.4$ . Список составлен на основе широкоформатных изображений ( $UBVRI$ ,  $H\alpha$ ), полученных группой проф. Ph. Massey [25] (USA). Для учета звезд с заметным поглощением был составлен дополнительный, третий, список, который включает 25 объектов до 19 зв. величины. Список включает желтые звезды с  $(B - V) < 1.2$ , т. к. LBV-звезды могут быть заметно покраснены. Естественно, большинство звезд списка есть горячие сверхгиганты, подсвечивающие  $HII$ -области. Список полон для звезд ярких сверхгигантов и не включает звезды главной последовательности. В него также вошли все известные звезды LBV и LBV-кандидаты в М33. Около 30% процентов звезд списка оказались переменными.

Для выделения звезд с собственной эмиссией в  $H\alpha$  была проведена спектроскопия около сотни звезд второго и третьего списков. Мы использовали такой подход в течение 20 лет и доказали его эффективность (Fabrika and Sholukhova [26]; Sholukhova et al. [27]; Fabrika et al. [28]; Sholukhova et al. [29]; Sholukhova et al. [13]). В конце 2007 г. на основе нашего списка в М33 мы открыли новую (седьмую) звезду LBV в М33 (Valeev et al. [3]); шестая LBV в М33 (V 532) спектрально была впервые подтверждена тоже нами (Sholukhova and Fabrika [30]). Мы обнаружили десятки LVB-подобных объектов, ждущих дальнейшего исследования. Ниже мы расскажем о некоторых наиболее интересных объектах.

## 2.2. Галактика М31

При выборе кандидатов в LBV в галактике М31 мы ориентировались на литературные данные. В статье Massey et al. [2] представлен список 24 кандидатов в М31. Используя этот список, мы

провели квазиодновременные наблюдения в оптическом и инфракрасном диапазоне шести кандидатов и двух известных LBV в М31 (Sholukhova et al. [7]). По результатам были рассчитаны SED (спектральные распределения энергии) и определены величины межзвездного поглощения, температуры и светимости.

Затем на 6-м телескопе САО РАН с 2012 по 2015 гг. в оптическом диапазоне получены спектральные и фотометрические данные еще четырнадцати звезд списка. Проведена классификация их на подтипы: четыре звезды оказались звездами LBV, семь звезд — B[e]-сверхгигантами и три звезды мы классифицируем как спящие LBV (Sholukhova et al. [31]).

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Все результаты, представленные ниже, были опубликованы авторами в серии статей до 2017 г.

### 3.1. Галактика М33

В результате спектроскопии звезд нашего списка LBV-кандидатов в М33 было обнаружено три новых кандидата в LBV (Valeev et al. [3, 4, 32]).

Объектом нашего пристального внимания уже 19 лет является подтвержденная нами LBV-звезда V 532 (Sholukhova et al. [13], Fabrika et al. [28], Sholukhova and Fabrika [30], Sarkisyan et al. [33]). Также мы проводим спектральный и фотометрический мониторинг «bona fide» LBV-звезд в этой галактике. Представляем здесь так же результаты исследования звезды Var C. Одним из необычных объектов нашего списка является звезда  $H\alpha$  19 (Sharov et al. [34]). Это двойная аккрецирующая система с биполярными выбросами. Далее мы представим несколько индивидуальных объектов.

#### 3.1.1. Объект N 45901

Объект N 45901 (номер по каталогу Valeev et al. [24]) имеет болометрическую светимость  $\lg(L/L_{\odot}) = 6.0-6.2$ , величина межзвездного поглощения  $A_V = 2.3 \pm 0.1$ . Температура фотосферы этой звезды  $T \sim 13\,000-15\,000$  К, ее вероятная масса на начальной главной последовательности  $M \sim 60-80 M_{\odot}$ . Инфракрасный избыток у N 45901 соответствует излучению теплой пыли с температурой  $T_{\text{warm}} \sim 1000$  К и составляет до 0.1% от болометрической светимости. Сравнение измерений звездных величин в различных каталогах указывает на переменность объекта N 45901. По светимости она соответствует известным LBV HR Car, Var A и Var C в М33. Спектр звезды очень похож на спектры известных LBV в М33. На

рис. 1 показан ее спектр вместе с двумя другими LBV-кандидатами и с Var A. В спектре видна широкая и сильная эмиссия линии  $H\alpha$  с протяженными крыльями ( $770 \text{ км с}^{-1}$  [4]). Природа этого объекта еще не до конца понятна. Humphreys et al. [6] в последних исследованиях классифицируют его как теплый гипергигант.

### 3.1.2. Объект N 125093

Болометрическая светимость объекта N 125093 (номер по каталогу Valeev et al. [24]) составляет  $\lg(L/L_{\odot}) = 6.3\text{--}6.6$ , величина межзвездного поглощения  $A_V = 2.75 \pm 0.15$ . Температуру фотосферы мы оцениваем как  $T \sim 13\,000\text{--}16\,000 \text{ К}$ , начальную массу как  $M \sim 90\text{--}120 M_{\odot}$ . Инфракрасный избыток у N 125093 составляет до 5–6% от болометрической светимости. В спектральном распределении энергии мы нашли две тепловые компоненты с температурами  $T_{\text{warm}} \sim 1000 \text{ К}$  и  $T_{\text{cold}} \sim 480 \text{ К}$ . В спектре N 125093 присутствуют линии [Ca II]  $\lambda\lambda 7291, 7323$ , которые наблюдаются также у LBV-подобных звезд Var A и N 93351 в M 33 (рис. 1). Эти линии свидетельствуют об относительно недавних выбросах газа и связанной с ними пылевой активностью. N 125093 соответствует по светимости известным LBV AG Car и Var B, V 532, N 93351 в M 33. Звезда имеет в спектре широкую и сильную эмиссию  $H\alpha$  с протяженными крыльями ( $1000 \text{ км с}^{-1}$  [4]). Позже она была классифицирована как теплый гипергигант (Humphreys et al. [5]).

### 3.1.3. Объект N 93351

Объект N 93351 (номер по каталогу Valeev et al. [24]) был обнаружен и детально изучен в 2008 г. Валеевым и др. [3]. В спектре звезды присутствует множество эмиссионных линий Fe II и [Fe II]; линии водорода, небулярные линии и линии [Ca II], Ti II, и Si II найдены в абсорбции. Звезда показала переменность за семь лет на 0.5 величины. Ее светимость  $\lg(L/L_{\odot}) \sim 6.27$ , температура  $T \sim 16\,000 \text{ К}$ , найдены два компонента излучения пыли  $T \sim 900 \text{ К}$  и  $420 \text{ К}$ . Спектр этой звезды демонстрирует широкую и сильную эмиссию  $H\alpha$  с протяженными крыльями ( $800 \text{ км с}^{-1}$ ). Звезда очень похожа на известную Var A в M 33 (рис. 1). Позже она была классифицирована как теплый гипергигант (Humphreys et al. [5]).

### 3.1.4. Объект V 532

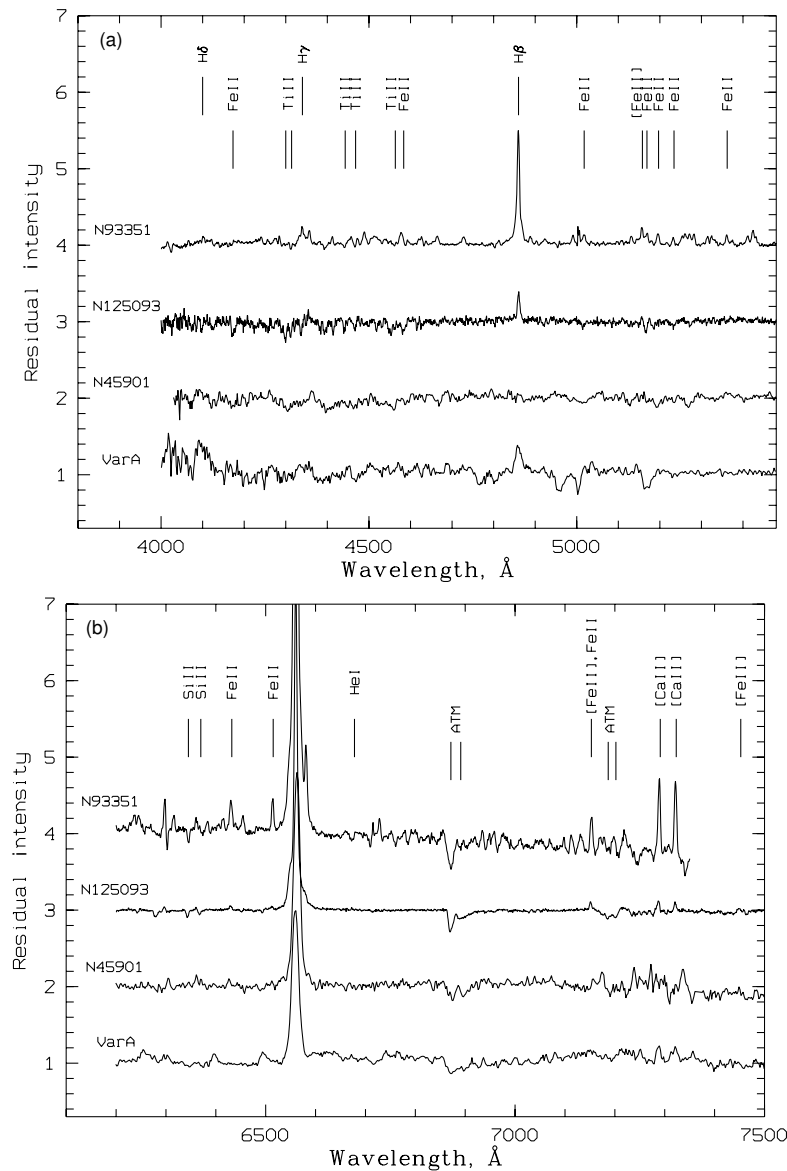
Обсудим результаты исследования спектральной и фотометрической переменности LBV-звезды V 532 (GR 290, Romano's star (Romano [35])) в галактике M 33. Фотометрические изменения прослежены с 1960 по 2017 гг., за это время звезда имела абсолютный максимум визуального блеска

(1992–1994 гг., высокое/холодное состояние) и абсолютный минимум (2015–2017 гг., низкое/горячее состояние) с разницей в блеске 2.3 звездных величины в фильтре B (Sholukhova et al. [13], Fabrika et al. [28], Sholukhova and Fabrika [30], Sarkisyan et al. [33], Zharova et al. [36]).

Спектральное поведение изучено с 1992 по 2017 гг., спектры покрывают как эти два крайних состояния, так и локальные минимумы и максимумы. Найдены оценки температуры в абсолютном максимуме  $T = 42\,000 \text{ К}$  и в абсолютном минимуме  $T = 22\,000 \text{ К}$ . Переменность спектра V 532 полностью соответствует изменениям температуры ее фотосферы. Изучено поведение разрешенных и запрещенных линий, отождествленных в спектре звезды. Сделан вывод, что все линии, и даже запрещенные, формируются в протяженной атмосфере звезды (в ее ветре). Обнаружена эволюция широких компонент наиболее ярких линий. Эти компоненты ( $FWHM$  от 1100 до 1800  $\text{км с}^{-1}$ ) также ведут себя соответственно температуре фотосферы. По всем спектрам и во всех линиях измерена скорость ветра V 532 как разница между эмиссионным и абсорбционным пиками в профилях типа P Cyg. Скорость ветра явно зависит от размера фотосферы звезды, то есть от величины визуального блеска: с уменьшением блеска скорость расширения ветра возрастает.

В состоянии абсолютного минимума блеска найден кинематический разрез атмосферы V 532. Ближе к фотосфере (линия He II 5412 Å) ветер расширяется со скоростью 330–350  $\text{км с}^{-1}$ , далее от фотосферы (линия He I) скорость ветра 400–470  $\text{км с}^{-1}$ , в более высоких слоях (H $\delta$ ) скорость 700–730  $\text{км с}^{-1}$ . Из этого следует, что скорость ветра возрастает наружу по мере ускорения ветра и что температура ветра в протяженной атмосфере V 532 падает с расстоянием от звезды. В низком/горячем состоянии спектральный класс звезды соответствует WN8.5h, в высоком/холодном — WN11. По диаграммам Crowther and Smith [37] мы проследили эволюцию V 532 совместно с эволюцией AG Car и массивной двойной WR-системой HD 5980 в галактике SMC (Fabrika et al. [19]). Все эти три звезды показывают переходы типа LBV  $\leftrightarrow$  WNL и требуют дальнейшего изучения.

В течение 1992–2015 гг. нами проводился спектроскопический и фотометрический мониторинг V 532 на телескопе БТА. На рис. 2 показаны спектры V 532 в голубом диапазоне. Верхний спектр 1992 г. был получен Szeifert et al. [38] в ярком состоянии. Остальные спектры были получены нами на телескопе БТА. Все эти спектры иллюстрируют изменение состояния звезды от



**Рис. 1.** Спектры LBV-кандидатов N 93351, N 45901 и N 125093 совместно со спектром известной LBV-звезды Var A в М 33. Спектры LBV-кандидатов показывают широкие эмиссионные линии  $H\alpha$ . На рисунке отмечены основные спектральные линии кандидатов.

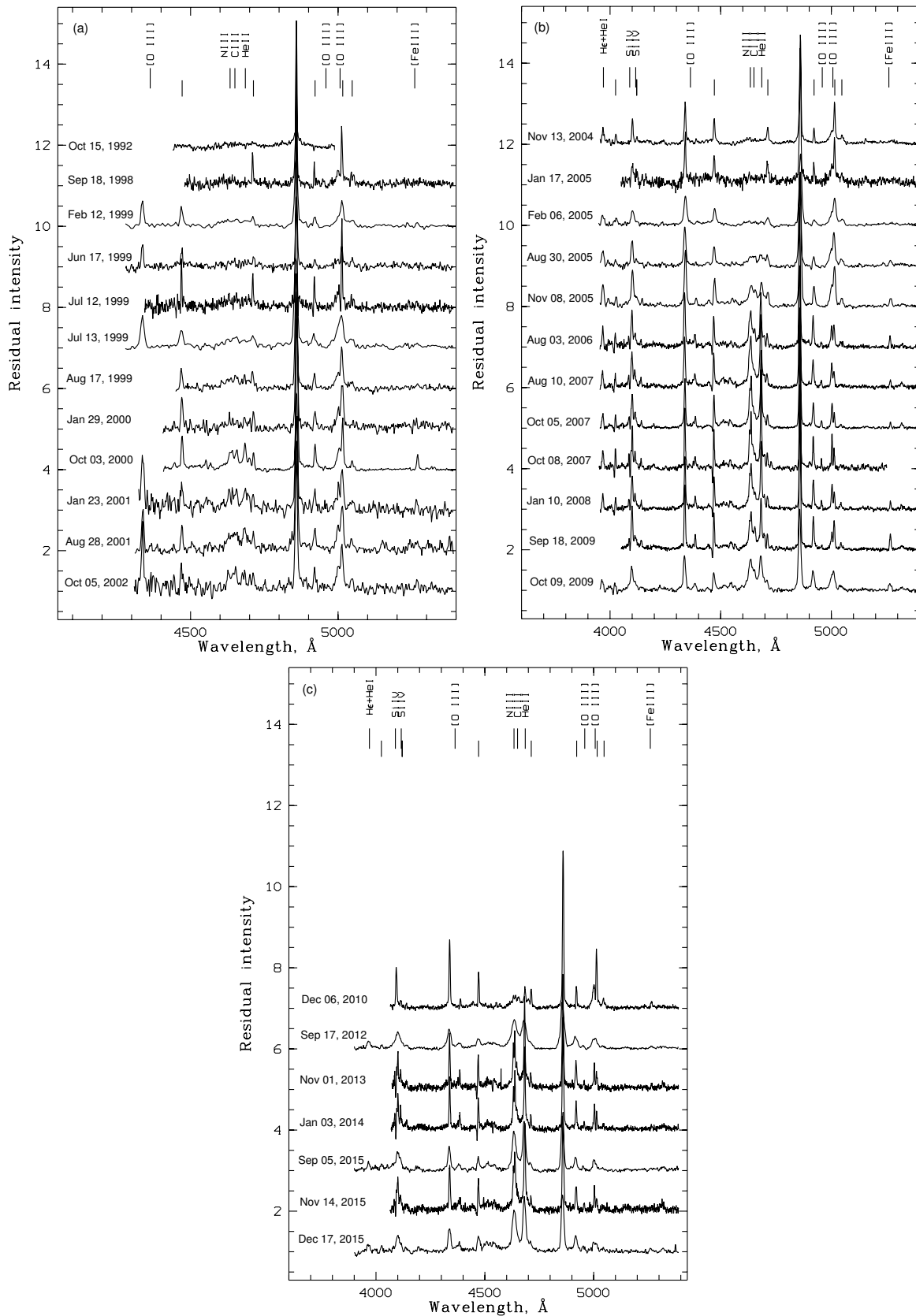
холодного (10–15 кК) до горячего (35–45 кК). С конца 2014 г. до нынешнего времени зафиксирован минимальный блеск звезды за все время наблюдений. В спектрах, полученных в этот период, обнаружены линии He II, C III, N III, которые указывают на высокую температуру звезды 35–45 кК.

Для определения фундаментальных параметров и эволюционного статуса этой звезды мы использовали наш метод подтверждения природы звезд LBV.

Для ряда эпох спектральных и фотометрических наблюдений V 532 нами были построены SED звезды в разных состояниях (см. рис. 3). Для оценки параметров звезды мы сначала оценили

примерные интервалы температур фотосферы в различных состояниях. Используя эти оценки, мы аппроксимировали фотометрические данные функцией Планка с учетом межзвездного поглощения при  $R_V = 3.07$ . Из-за вырождения результатов аппроксимации по параметрам  $A_V$ ,  $T$  и  $R$  в общем случае однозначно определить эти параметры невозможно. Однако в случае LBV, когда оптический блеск звезды меняется при сохранении постоянной болометрической светимости (Humphreys and Davidson [1]), можно решить проблему вырождения.

Накладывая ограничения на параметры модели, которые следуют из постоянства болометриче-



**Рис. 2.** Спектры V 532 в голубой области. Спектры нормализованы на континуум и сдвинуты по вертикальной оси каждый на 1.0. Показаны основные линии, которые изменяются в различных состояниях звезды. Линии He I отмечены вертикальными маркерами без подписей. Чтобы не загромождать рисунок, водородные линии не отмечены.

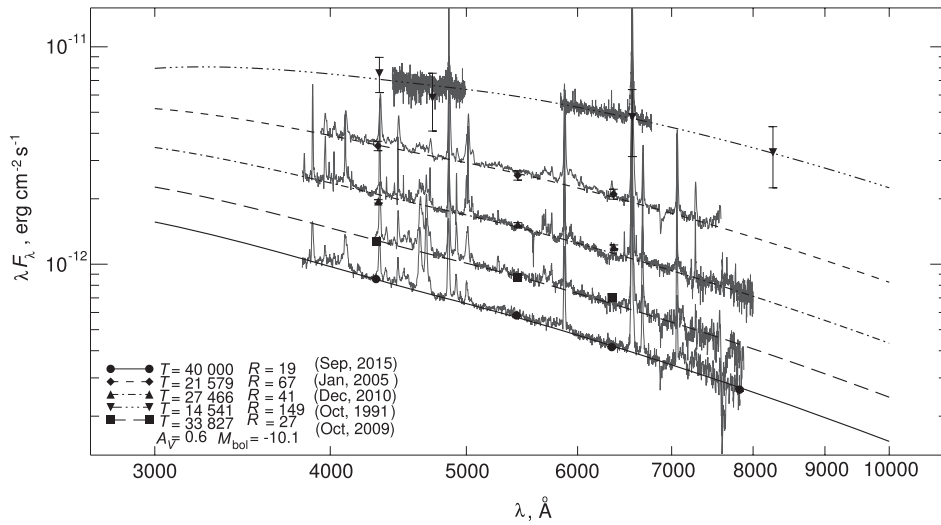


Рис. 3. Спектры, фотометрия и SED LBV-звезды V 532. Сверху вниз показаны данные: 1992 г. (*B, Jpg, Fpg, Npg* (Lasker et al. [39])), 2005 г., 2010 г., 2009 г. (*B, V, R*) и 2015 г. (*B, V, R, I*). Линии показывают аппроксимацию фотометрических данных моделью.

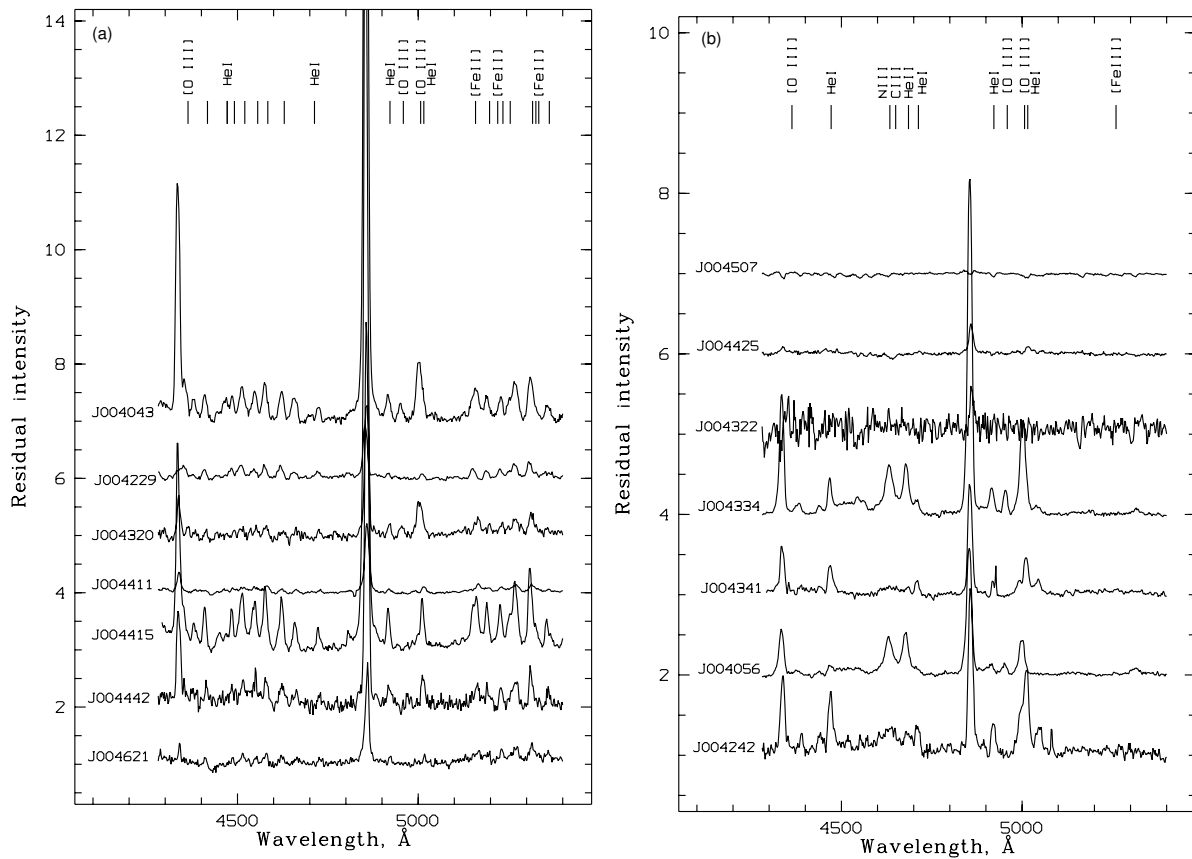


Рис. 4. (a): семь фрагментов спектров звезд, классифицированных как [Be]-сверхгиганты. Большое количество эмиссионных линий, Fe II и [Fe II], обнаруженных в спектрах, позволяют отнести эти звезды к данному классу. (b): семь спектров других кандидатов.

ской светимости ( $\sigma T^4 \pi R^2 = const$ ) и величины межзвездного поглощения ( $A_V = const$ ), а также зная предварительные оценки температуры звезды по спектрам, в результате аппроксимации мы определили фундаментальные параметры звезды V 532. Величина  $A_V$  составила  $0.6 \pm 0.2$ . С 1992 по 2017 гг. температура звезды изменялась от 15 000 К до 40 000 К, радиус изменялся от  $150 R_\odot$  до  $20 R_\odot$  соответственно. При этом абсолютная болометрическая звездная величина составила  $-10.2 \pm 0.2$  (Sarkisyan et al. [33]). Некоторые авторы отмечают, что хотя это и яркая, горячая и переменная звезда, она не демонстрирует типичную переменность LBV-типа с формированием оптически толстого холодного ветра, и считают ее поздней WN-звездой [6, 40].

### 3.1.5. LBV-звезда Var C

С изучением объекта Var C в M 33 мы попали на самый пик интереса к нему. Из-за вспышки звезды в январе 2013 г. он приковал к себе интерес нескольких групп исследователей. Были выпущены две астрономические телеграммы [41, 42], нам удалось получить спектр, в котором можно было детектировать широкие и узкие компоненты водородных линий, лес Fe II-эмиссионных линий, слабые He I и Si II и сделать вывод о кардинальном изменении спектра, а значит, и эволюционного статуса этой звезды. (Valeev et al. [43]). Кроме того, в составе большой международной группы с нашим участием была опубликована статья о долговременной фотометрической и спектральной переменности Var C (Burggraf et al. [44]).

## 3.2. Галактика M 31

В галактике Туманность Андромеды мы получили спектры и фотометрию всех 24 LBV-кандидатов из списка Массея [2] и проклассифицировали их (Sholukhova et al. [31]). Также представляем результаты мониторинга и исследования известных LBV-звезд. Все изучаемые звезды находятся в скученных полях и окружены туманностями, что затрудняет редукцию данных. Специально для таких случаев мы создали новый код SPEXTRA для оптимальной экстракции длинношелевых спектров в скученных полях (Sarkisyan et al. [45]). Мы использовали этот код для лучшей экстракции LBV-кандидатов в M 33 и M 31.

Обсуждаем разработанный нами метод определения фундаментальных параметров LBV на примере AE And и Var A-1 и открытых нами двух новых звезд LBV: J 004051.59 и J 004526.62 (Sholukhova et al. [7]).

### 3.2.1. Классификация LBV-кандидатов по спектру

В последнее время в галактике M 31 увеличилось количество спектроскопически подтвержденных кандидатов в LBV (Massey et al. [2], Humphreys et al. [6], Sholukhova et al. [31]), которые требуют дополнительной классификации. В течение 2012–2015 гг. нами проводились спектральные и фотометрические наблюдения 14 кандидатов в LBV-звезды в галактике M 31 из списка Массея [2]. Спектры были получены на спектрографе SCORPIO на телескопе БТА в диапазоне 3500–7200 Å. По спектрам, фотометрии и *mbox JHK*-данным из обзора 2MASS (Cutri et al. [46]) мы разбили их на три подкласса: собственно LBV-звезды, [Be]-сверхгиганты ([Be]SGs) и сверхгиганты.

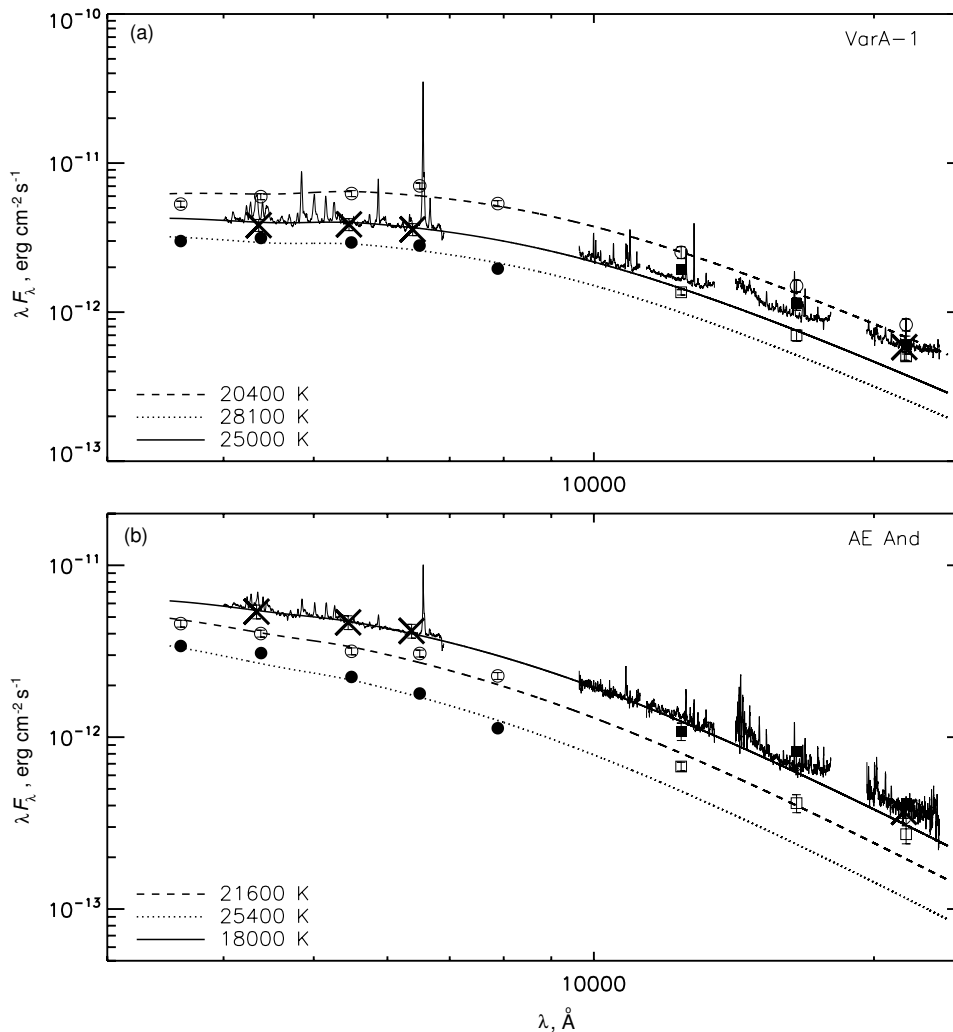
На рис. 4а мы представляем семь фрагментов спектров звезд, классифицированных нами как [Be]-сверхгиганты. На рис. 4б мы показываем семь спектров остальных звезд. Четыре нижних спектра (J 004056, J 004242, J 004334, J 004341) показывают эмиссионные линии He I, He II, C III, and N III, которые указывают на высокую температуру звезд 35 000–50 000 К и на принадлежность к классу LBV. Их спектры подобны спектрам известных LBV в M 31 и M 33. На спектрах трех верхних звезд видны только эмиссии или P Cyg-профили водородных линий и абсорбции металлов, поэтому их мы отнесли к классу сверхгигантов.

### 3.2.2. Классификация LBV-кандидатов по SED

Для получения параметров LBV-звезд в M 31 мы применили наш метод сравнения SED в разных состояниях звезды. Он основан на особом свойстве, присущем только LBV звездам — постоянстве болометрической светимости. Когда звезда уменьшается в размере (фотосфера звезды сжимается), температура ее фотосферы увеличивается, оптический блеск звезды ослабевает; когда звезда расширяется, ее температура уменьшается, яркость звезды увеличивается. При этом может быть решена проблема вырождения параметров  $A_V$ – $T$ , поскольку при разных состояниях LBV-звезды может быть рассчитана температура и визуальный блеск звезды при постоянном межзвездном покраснении и болометрической светимости. (Sholukhova et al. [7, 13]). Известны только два случая другого поведения: Groh et al. [12] показали, что AG Car уменьшает светимость, а R 71 в LMC увеличивает свою светимость в ходе большой вспышки (Mehner et al. [47]).

В 2011–2012 гг. мы исследовали пять кандидатов в LBV-звезды и две известные LBV (AE And и Var A-1) в галактике M 31 в оптическом диапазоне на телескопе БТА со спектрографом SCORPIO и в инфракрасном — на Triplespec 3.5-м телескопа





**Рис. 5.** SED-модели для AE And и Var A-1. Крестиками показана *BVRK*-фотометрия, полученная одновременно с нашими спектрами, заполненные кружки — данные Massey et al. [25], незаполненные кружки — данные Humphreys et al. [48]. Заполненные и незаполненные квадраты — данные каталогов 2MASS-1 и 2MASS-2 (Cutri et al. [46, 49]) соответственно. Аппроксимация проведена кривыми чернотельного приближения с учетом покраснения. Сплошными линиями показаны приближения оптической части наших спектров, штриховыми линиями — данных Humphreys et al. [48], пунктирными — данных Massey et al. [25]. Наилучшие приближения температуры указаны в легенде на каждой панели.

Apache Point Observatory. Все кандидаты показали изменения блеска разной амплитуды, а их светимости и спектры подобны LBV.

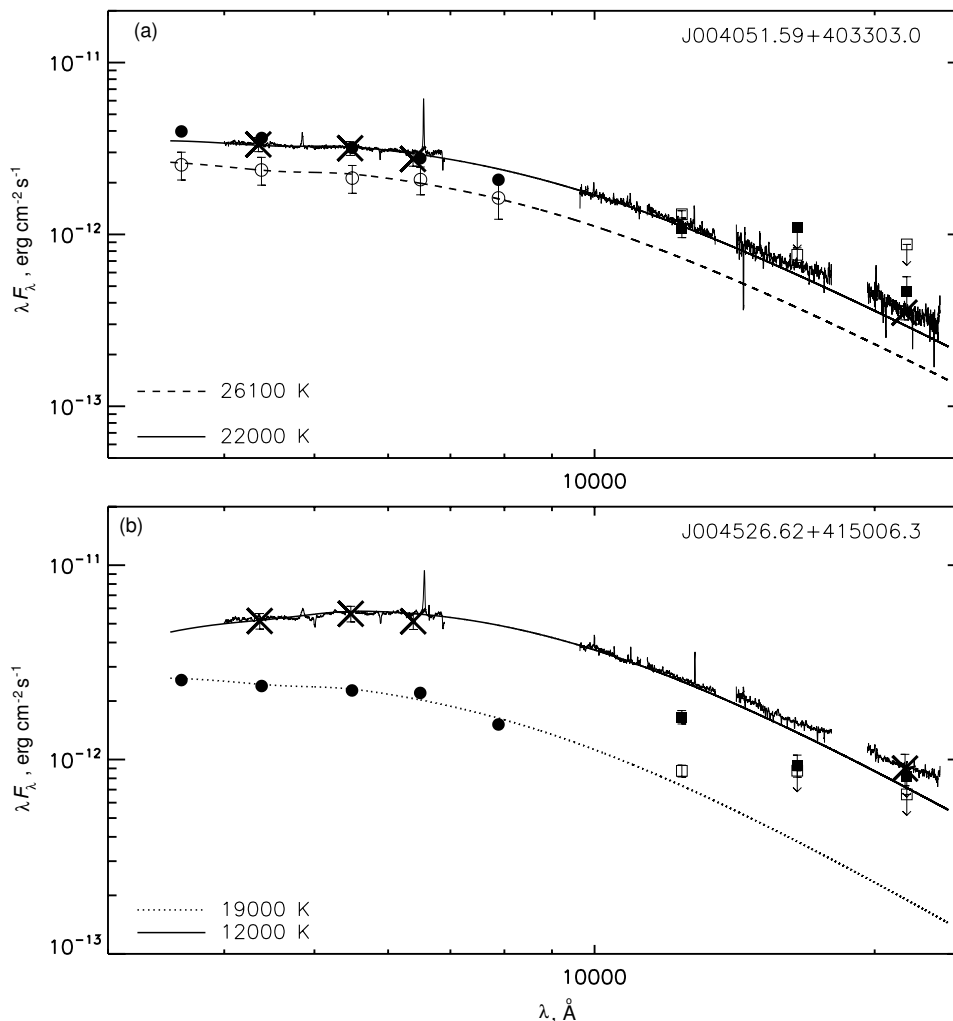
Мы протестировали наш метод на полученных данных для AE And и Var A-1. На рис 5 показаны спектральные распределения энергии для этих звезд. Ромбы — фотометрия *BVR*, полученная одновременно со спектрами. Показаны разные состояния LBV-звезд. Все SED, включая пыль, аппроксимированы чернотельным излучением. Приведены эффективные температуры звезд в предположении постоянной  $M_{bol}$  и  $A_V$ . Видно хорошее согласование SED.

С помощью нашего метода мы доказали принадлежность звезд J 004051.59 и J 004526.62 к классу

LBV. На рис. 6 показаны их спектральные распределения энергии для двух наборов данных. Звезду J 004350.50 мы классифицировали как «спящую» LBV. Две звезды (J 004417.10 и J 004444.5) мы классифицировали как B[e]-сверхгиганты ([Be]SGs) (Sholukhova et al. [13]).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ

LBV — это массивные звезды, находящиеся в верхней части диаграммы Герцшпрунга–Рессела (ГР). Там же располагаются и другие массивные звезды: горячие O-звезды, красные и голубые сверхгиганты, WR-звезды, LBV-подобные звезды типов WNL или Orfe/WN и B[e]-сверхгиганты. Поэтому объяснить феномен



**Рис. 6.** SED-модели для J 004051.59 и J 004526.62. Крестиками показана *BVRK*-фотометрия, полученная одновременно с нашими спектрами, заполненные кружки — данные Massey et al. [25], незаполненные кружки — данные Berkhuijsen et al. [50]. Заполненные и незаполненные квадраты — данные каталогов 2MASS-1 и 2MASS-2 (Cutri et al. [46, 49]) соответственно. Аппроксимация проведена кривыми чернотельного приближения с учетом покраснения. Сплошными линиями показаны приближения оптической части наших спектров, штриховыми линиями — данных Berkhuijsen et al. [50], пунктирными — данных Massey et al. [25]. Наилучшие приближения температуры указаны в легенде на каждой панели.

LBV-звезд достаточно сложно. На критических стадиях эволюции массивные звезды испытывают значительные превращения; наблюдаемые параметры этих звезд сильно различаются. В то же время на разных стадиях существования LBV-звезд показывают характеристики других типов массивных звезд. В максимуме оптического блеска LBV может представлять собой A–F-гипергигант, в минимуме — эта же звезда может показывать спектр типа WN. Особенно интересно установить связь между LBV и V[e]-сверхгигантами (SgB[e]) (Kraus et al. [17]), которые подобны по светимости и спектру в горячей фазе LBV. В чем заключается физическая разница между этими типами звезд, неизвестно, но существует ряд критериев, по которым мы можем их разделить.

17 лет назад Фабрика опубликовал статью [51], где было высказано предположение, что SgB[e] — это тесные двойные системы, а LBV представляют собой одиночные звезды или широкие пары. В будущем мы ставим задачу подтвердить или опровергнуть эту гипотезу. В пользу этой гипотезы говорят несколько уже известных различий в наблюдательных проявлениях таких звезд:

1. Существует разница в переменности блеска. LBV сильно меняют свой блеск, а амплитуда переменности SgB[e] не более 0.1–0.2 величины;
2. У SgB[e] наблюдается большая линейная поляризация (Bjorkman [52]);
3. SgB[e] имеют ИК-избытки в отличие от LBV

(Oksala et al. [16]), которые не содержат тепловой пыли.

Кроме того, эту гипотезу можно проверить, проводя спектральный мониторинг известных LBV и SgB[e] на предмет поиска переменности лучевых скоростей, что мы и собираемся сделать на примере звезд галактик М 33 и М 31. Сейчас открыто достаточное количество LBV и SgB[e]-звезд в галактиках М 33 и М 31, от пяти до десяти объектов каждого типа. Эта выборка достаточно репрезентативна для исследования двойственности SgB[e] и отсутствия таковой у LBV. Амплитуда переменности лучевых скоростей ожидается до  $200 \text{ км с}^{-1}$  у этих звезд. За 2–3 года спектральных наблюдений мы можем выяснить, являются ли SgB[e] тесными двойными системами. Спектроскопия известных звезд LBV покажет, есть ли периодические (или случайные) колебания их лучевых скоростей, поскольку известные LBV систематически спектрально никогда не изучались. Существуют несколько LBV в нашей Галактике, у которых была заподозрена или обнаружена двойственность. В первую очередь это касается Eta Carina и нескольких других LBV (Smith et al. [53]).

Помимо этого, новую информацию о природе этих объектов дадут исследования этих звезд в ИК-диапазоне. Oksala et al. [16] и Kraus et al. [17] предложили новый тип классификации LBV-подобных звезд на основе ИК данных. На диаграмме  $(J - H) - (H - K)$  LBV-звезды и SgB[e]s разделяются на две отдельные группы. Мы уже использовали эту диаграмму для классификации наших LBV-кандидатов в М 31 (Sholukhova et al. [31]) и подтвердили действенность этого критерия. Новые ИК-данные, доступные из архивов WISE и Spitzer, расширяют ИК-диапазон до 21 мк и дают новые критерии для отбора LBV-звезд и новые возможности для изучения пылевых оболочек вокруг изучаемых нами звезд. Инфракрасных спектров LBV-звезд, а особенно для объектов в других галактиках получено крайне мало. Kraus et al. [17] получили инфракрасные спектры для четырех LBV-кандидатов в М 31 (один из них совпал с объектом из нашего списка); Humphreys et al. [6, 8] также получили несколько спектров. Нами получены и проанализированы еще четыре ИК-спектра LBV-кандидатов в М 31. Находятся в работе еще пять ИК-спектров и десять фотометрических точек со спектрографа Triplespec 3.5-м телескопа Apache Point Observatory. Мы надеемся на дальнейший прогресс в понимании природы LBV-звезд.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Данное исследование поддержано Российским научным фондом № 14-50-00043 в части редукации

данных. О.Ш., А.С. и А.В. благодарят Российской фонд фундаментальных исследований (грант № 16-02-00758). Мы благодарим Роберту Хемфри и рецензентов за полезные замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 1025 (1994).
2. P. Massey, R. T. McNeill, K. A. G. Olsen, et al., *Astron. J.* **134**, 2474 (2007).
3. A. F. Valeev, O. Sholukhova, and S. Fabrika, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **396**, L21 (2009).
4. A. F. Valeev, O. N. Sholukhova, and S. N. Fabrika, *Astrophysical Bulletin* **65**, 381 (2010).
5. R. M. Humphreys, K. Davidson, S. Grammer, et al., *Astrophys. J.* **773**, 46 (2013).
6. R. M. Humphreys, K. Weis, K. Davidson, et al., *Astrophys. J.* **790**, 48 (2014).
7. O. Sholukhova, D. Bizyaev, S. Fabrika, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, 2459 (2015).
8. R. M. Humphreys, J. C. Martin, and M. S. Gordon, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **127**, 347 (2015).
9. R. M. Humphreys, M. S. Gordon, J. C. Martin, et al., *Astrophys. J.* **836**, 64 (2017).
10. J. H. Groh, G. Meynet, S. Ekström, and C. Georgy, *Astron. and Astrophys.* **564**, A30 (2014).
11. L. F. Smith, M. M. Shara, and A. F. J. Moffat, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **281**, 163 (1996).
12. J. H. Groh, D. J. Hillier, A. Daminieli, et al., *Astrophys. J.* **698**, 1698 (2009).
13. O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, A. V. Zharova, et al., *Astrophysical Bulletin* **66**, 123 (2011).
14. G. Koenigsberger, L. Georgiev, D. J. Hillier, et al., *Astron. J.* **139**, 2600 (2010).
15. J. S. Clark, N. Castro, M. Garcia, et al., *Astron. and Astrophys.* **541**, A146 (2012).
16. M. E. Oksala, M. Kraus, L. S. Cidale, et al., *Astron. and Astrophys.* **558**, A17 (2013).
17. M. Kraus, L. S. Cidale, M. L. Arias, et al., *Astrophys. J.* **780**, L10 (2014).
18. S. Fabrika and O. Sholukhova, *Astrophys. and Space Sci.* **226**, 229 (1995).
19. S. Fabrika, Y. Ueda, A. Vinokurov, et al., *Nature Physics* **11**, 551 (2015).
20. G. Courtes, H. Petit, M. Petit, et al., *Astron. and Astrophys.* **174**, 28 (1987).
21. G. R. Ivanov, W. L. Freedman, and B. F. Madore, *Astrophys. J. Suppl.* **89**, 85 (1993).
22. S. N. Fabrika, O. N. Sholukhova, and S. A. Zakharova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **43**, 133 (1997).
23. O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, V. V. Vlasyuk, and A. N. Burenkov, *Astronomy Letters* **23**, 458 (1997).
24. A. F. Valeev, O. N. Sholukhova, and S. N. Fabrika, *Astrophysical Bulletin* **65**, 140 (2010).
25. P. Massey, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, et al., *Astron. J.* **131**, 2478 (2006).
26. S. N. Fabrika and O. N. Sholukhova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **43**, 149 (1997).

27. O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, and V. V. Vlasyuk, *Astronomy Letters* **25**, 14 (1999).
28. S. Fabrika, O. Sholukhova, T. Becker, et al., *Astron. and Astrophys.* **437**, 217 (2005).
29. O. Sholukhova, P. Abolmasov, S. Fabrika, and V. Afanasiev, *ASP Conf. Ser.* **361**, 491 (2007).
30. O. Sholukhova and S. Fabrika, *ASP Conf. Ser.* **221**, 171 (2000).
31. O. Sholukhova, S. Fabrika, and A. Valeev, *ASP Conf. Ser.* **510**, 468 (2017).
32. A. F. Valeev, O. Sholukhova, and S. Fabrika, *Astron. Astrophys. Transactions* **27**, 439 (2012).
33. A. Sarkisyan, O. Sholukhova, S. Fabrika, and A. Valeev, *ASP Conf. Ser.* **510**, 474 (2017).
34. A. S. Sharov, V. P. Goranskii, and S. N. Fabrika, *Astronomy Letters* **23**, 37 (1997).
35. G. Romano, *Astron. and Astrophys.* **67**, 291 (1978).
36. A. Zharova, V. Goranskij, O. N. Sholukhova, and S. N. Fabrika, *Peremennye Zvezdy Prilozhenie* **11** (2011).
37. P. A. Crowther and L. J. Smith, *Astron. and Astrophys.* **320**, 500 (1997).
38. T. Szeifert, *Liege Intern. Astrophys. Coll.*, **33**, 459 (1996).
39. B. M. Lasker, M. G. Lattanzi, B. J. McLean, et al., *Astron. J.* **136**, 735 (2008).
40. V. F. Polcaro, C. Rossi, R. F. Viotti, et al., *Astron. J.* **141**, 18 (2011).
41. C. Rossi, R. Viotti, F. Montagni, and R. Gualandi, *Astronomer's Telegram*, No. 5403 (2013).
42. R. M. Humphreys, K. Weis, B. Burggraf, et al., *Astronomer's Telegram*, No. 5362 (2013).
43. A. Valeev, S. Fabrika, and O. Sholukhova, *Astronomer's Telegram*, No. 5538 (2013).
44. B. Burggraf, K. Weis, D. J. Bomans, et al. *Astron. and Astrophys.* **581**, A12 (2015).
45. A. N. Sarkisyan, A. S. Vinokurov, Y. N. Solovieva, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 486 (2017).
46. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, et al., *VizieR Online Data Catalog*, 2246 (2003).
47. A. Mehner, D. Baade, T. Rivinius, et al., *Astron. and Astrophys.* **555**, A116 (2013).
48. R. M. Humphreys, C. Blaha, S. D'Odorico, et al., *Astrophys. J.* **278**, 124 (1984).
49. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, et al., *VizieR Online Data Catalog*, 2281 (2012).
50. E. M. Berkhuijsen, R. M. Humphreys, F. D. Ghigo, and W. Zomach, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **76**, 65 (1988).
51. S. Fabrika, *ASP Conf. Ser.* **204**, 57 (2000).
52. J. E. Bjorkman, *ASP Conf. Ser.* **355**, 231 (2006).
53. N. Smith, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415**, 773 (2011).

## **LBV Candidates in M 31 and M 33. Overview of 20 Years of the 6-m Telescope: Observations and Results**

**O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, A. F. Valeev, and A. N. Sarkisian**

An ongoing SAO RAS program for the 6-m telescope to search for and study luminous blue variable (LBV) candidates in the M 31 and M 33 galaxies was started in 1997. This paper summarizes the results of our observations over the last 20 years. Over this time, we have a general lists of candidates and obtained photometry and spectroscopy for approximately one hundred stars from the list. A detailed study and classification of LBV candidates were carried out. We also monitored spectrally and photometrically the confirmed LBV stars in these galaxies. Based on these results, the spectral energy distributions (SEDs) of LBVs and LBV candidates were computed, and the interstellar extinction values, temperature, and luminosity were derived. We propose a new method of confirming the nature of LBV stars. It is based on a special property exhibited only by LBV stars—the constancy of the bolometric luminosity, with except of a rare phase of giant eruption, registered for two historical LBVs in our galaxy and about few dozen extragalactic LBVs. Using this method, we determine the fundamental parameters of these stars: temperature, radius, luminosity, and interstellar extinction. We discuss the nature of several individual LBV stars discovered by us in M 33 and the classification of the LBV candidates in M 31. Thus, for 20 years of observations we have found four LBV stars in M 33; in the M 31 galaxy with different methods, we have confirmed seven objects as a LBV class.

*Keywords: stars: massive—stars: variables: LBV—galaxies: individual: M 31, M 33*