

ДВА НОВЫХ LBV-КАНДИДАТА В ГАЛАКТИКЕ М 33

© 2010 А. Ф. Валеев*, О. Н. Шолухова, С. Н. Фабрика

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 26 июля 2009 г.; принята в печать 28 июля 2009 г.

Представлены два новых кандидата в яркие голубые переменные (LBV) звезды, обнаруженные в галактике М 33. Эти звезды были выделены нами [1] как кандидаты в массивные звезды на финальных стадиях эволюции, предположительно с заметным межзвездным поглощением. Кандидаты были отобраны из каталога [2], по следующим критериям: эмиссия в $H\alpha$, $V < 18^m.5$ и $0^m.35 < (B - V) < 1^m.2$. Обе найденные звезды имеют в своих спектрах широкую и сильную эмиссию $H\alpha$ с протяженными крыльями (770 и 1000 км/с). Исследуя их спектры, мы оценили основные параметры звезд. Объект N 45901 имеет болометрическую светимость $\log(L/L_{\odot}) = 6.0 - 6.2$ при величине межзвездного поглощения $A_V = 2.3 \pm 0.1$. Температура фотосферы этой звезды оценивается как $T_{\star} \sim 13000 - 15000$ 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 $T_{\text{тепл}} \sim 1000$ К и составляет 0.1% от болометрической светимости. Сравнения измерений звездных величин в различных каталогах указывает на вероятную переменность объекта N 45901. Болометрическая светимость второго объекта N 125093 составляет $\log(L/L_{\odot}) = 6.3 - 6.6$, величина межзвездного поглощения $A_V = 2.75 \pm 0.15$. Температуру фотосферы мы оцениваем как $T_{\star} \sim 13000 - 16000$ К, исходную массу $M \sim 90-120 M_{\odot}$. Инфракрасный избыток у N 125093 составляет 5–6% от болометрической светимости. В ее спектральном распределении энергии мы нашли две тепловые компоненты с температурами $T_{\text{тепл}} \sim 1000$ К и $T_{\text{хол}} \sim 480$ 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 М 33. Эти линии свидетельствуют об относительно недавних выбросах газа и сопряженной с ними пылевой активностью. Высокая болометрическая светимость этих звезд и широкие эмиссии $H\alpha$ позволяют отнести исследуемые объекты к LBV-кандидатам.

Ключевые слова: *звезды-свойства и классификация*

1. ВВЕДЕНИЕ

Голубые яркие переменные (Luminous Blue Variables) — наиболее массивные звезды, находящиеся на одной из финальных стадий эволюции [3]. Малое количество массивных звезд в галактиках и очень короткая шкала фазы LBV ($10^4 - 10^5$ лет) делает эти объекты уникальными. Исследование звезд типа LBV необходимо для понимания эволюции звезд верхней части главной последовательности, формирования WR-звезд, сверхновых, релятивистских звезд (черных дыр), для понимания механизмов потери массы, обогащения галактик тяжелыми элементами.

Считается, что фазу LBV проходят звезды с массой более $40 M_{\odot}$ [4]. Однако связь между звездами LBV и другими типами массивных звезд на финальных стадиях эволюции (красными сверхгигантами RSG, желтыми сверхгигантами YSG, голубыми сверхгигантами BSG,

V[e]-сверхгигантами, WR-звездами) и эволюционные переходы между этими типами звезд пока неясны [5]. Звезды LBV тесно связаны с поздними WR-звездами азотной последовательности с водородом в оболочках (WNLh). Из наблюдений известно два случая перехода: LBV \rightarrow WNLh (звезда V 532 в М 33, [6]) и WN3 \rightarrow WN11(LBV) \rightarrow WN4/5 (звезда HD5980 в галактике SMC, [7]).

Наблюдательные проявления LBV-звезд чрезвычайно разнообразны [8], а количество известных объектов этого типа мало. По этой причине неясно, являются ли LBV однородным классом объектов. Например, почему у переменных типа S Dor [3, 8] не наблюдались гигантские извержения (giant eruptions), такие как у звезд η Car и P Cyg. Также трудно сделать определенные выводы о месте стадии LBV в эволюции массивных звезд, тем более о том, какое влияние на этой стадии оказывает двойственность и быстрое вращение.

Очевидно, что решение перечисленных выше

*E-mail: azamat@sao.ru

проблем возможно только при достаточно большом количестве исследованных объектов. Наблюдая больше звезд типа LBV, мы повышаем шансы застать редкие переходы типа LBV \leftrightarrow WN. Это позволит со временем проверить современные эволюционные последовательности и зависимость разных этапов эволюции массивных звезд от количества тяжелых элементов (Z).

В нашей Галактике, по-видимому, большинство LBV-звезд без заметного межзвездного поглощения уже открыто. Однако в современных ИК-обзорах возможно обнаружение еще нескольких десятков подобных объектов [9, 10]. В галактике М 33 возможно обнаружение почти всех LBV-подобных объектов, так как её удачная ориентация (её ось вращения наклонена к лучу зрения под углом 56 градусов [11]) и относительно близкое расстояние (950 Мпк, [12]) позволяют проводить в ней детальную спектроскопию ярких звезд.

В обзоре [3], посвященном LBV-звездам, к подтвержденным членам этого класса было отнесено пять звезд в нашей Галактике и 15 звезд в галактиках Местной группы. В частности, в галактике М 33 авторы выделили четыре LBV-звезды. В недавней работе [13] упоминается 12 LBV-звезд и 23 LBV-кандидата в нашей Галактике, а в галактике М 33 сейчас известно 37 кандидатов в LBV [14].

Согласно каталогу [2], в галактике М 33 содержится 2304 звездных объекта с $V < 18^m.5$. Если принять, что среднее межзвездное поглощение наиболее ярких звезд в ней составляет $A_V \approx 1^m.0$ (см., например, [15]), где эта величина оценивается как $A_V \approx 0^m.95 \pm 0^m.05$, то при модуле расстояния до М 33 $(m-M)_0 = 24^m.9$ [12] звезды с $V < 18^m.5$ и $(B-V) < 0^m.35$ будут иметь светимость $M_V < -7^m.4$ и цвет $(B-V)_0 \leq 0^m.0$. В работе [1] мы профотометрировали на $H\alpha$ -изображениях все звезды из каталога [2] с указанными выше ограничениями по цвету и светимости и отобрали звезды с превышениями потока в $H\alpha$. Это яркие сверхгиганты классов светимости Iab и ярче и наиболее горячие сверхгиганты (со спектрами B0 и ранее) класса Ib [16]. Мы ожидали, что в наш список попадут все потенциальные кандидаты в LBV-звезды. Таким образом, в работе [1] было выделено 185 голубых эмиссионных объектов ($V < 18^m.5$ и $(B-V) < 0^m.35$), кандидатов в массивные звезды на финальных стадиях эволюции.

Очевидно, что LBV и подобные им объекты вполне могут иметь поглощение $A_V > 1^m.0$. По этой причине в [1] был составлен *дополнительный список* звезд с $V < 18^m.5$ и $0^m.35 < (B-V) < 1^m.2$ с эмиссией в $H\alpha$, в него попало 25 кандидатов.

В настоящее время мы проводим спектроскопию объектов из обоих наших списков [1]. В первом списке была обнаружена звезда N 93351 типа LBV,

Таблица 1. Журнал спектральных наблюдений.

Объект	Дата	Диапазон (разрешение)	Время Экспозиции
N 45901	2010.01.09	3700–7200 Å (12 Å)	2 × 1200 ^s
N 125093	2009.10.09	3700–7200 Å (12 Å)	1 × 600 ^s
	2009.10.23	3900–5700 Å (5 Å)	2 × 1200 ^s
	2009.11.09	5700–7400 Å (5 Å)	4 × 900 ^s

которая находится в ядерной области галактики М 33 [17]. Два объекта из нашего дополнительного списка (предположительно с заметным собственным покраснением) были классифицированы ранее [14] как горячие LBV-кандидаты: N 6862 с $B-V = 0^m.52$ и N 141751 с $B-V = 0^m.77$.

Недавно нами были получены спектры 15 звезд-кандидатов из дополнительного списка, среди них было обнаружено два новых кандидата в LBV. В данной работе мы представляем результаты исследования этих двух объектов.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

2.1. Спектральные данные

Спектры двух новых кандидатов в LBV, N 45901 и N 125093 были получены на 6-м телескопе САО РАН на приборе SCORPIO, установленном в первичном фокусе. В журнале наблюдений, приведенном в Таблице 1, указаны даты наблюдений, спектральный диапазон, спектральное разрешение, количество экспозиций и их продолжительность. При наблюдениях использовалась щель шириной 1", её ориентация показана на Рис. 1. Качество изображений во время наблюдений было от 1''.2 до 3''.0.

Обработка спектров была выполнена стандартным образом. После чистки следов космических частиц выполнены следующие процедуры редукации: исправление за уровень электронного нуля (bias), деление на плоское поле квазиравномерной засветки лампы, калибровка по длинам волн по спектру NeAr-лампы, исправление за спектральную чувствительность матрицы и приведение к потокам в энергетических единицах.

2.2. Фотометрические данные

Были использованы изображения галактики М 33 из архива космического телескопа Spitzer (заявитель R. H. Gehrz), которые были получены 9 июля и 22 августа 2004 года и 21 января и

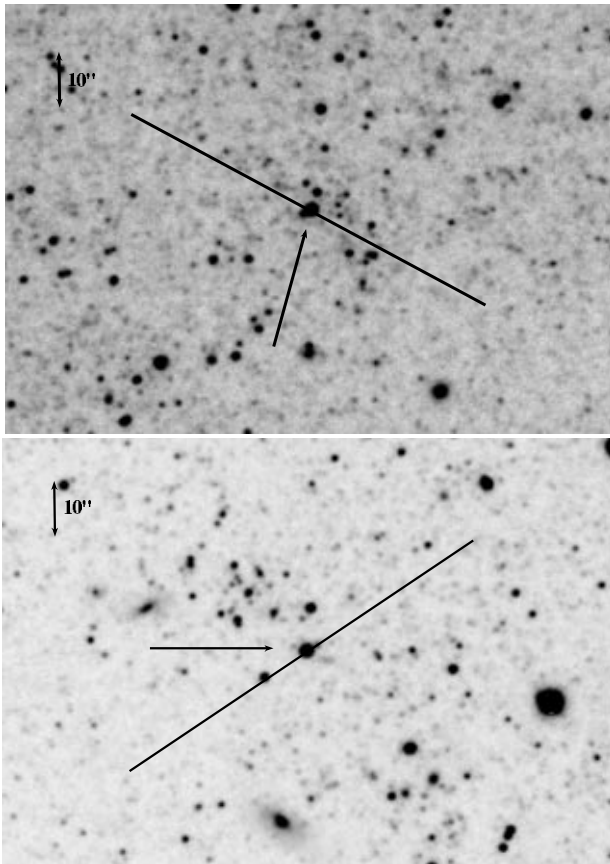


Рис. 1. Карты отождествления в фильтре V для объектов N 45901 (вверху) и N 125093 (внизу), стрелками отмечено их положение. Показана ориентация щели при наблюдениях. Север вверху, запад слева.

10 июня 2005 года в 4 фильтрах (3.6, 4.5, 5.8 и 8.0 μm) на инфракрасной камере IRAC [18]. Для каждого фильтра камера имеет свою ПЗС-матрицу размером 256 \times 256 пикселей с масштабом порядка 1''2 на пиксел. Для фотометрии мы использовали изображения всей галактики М 33, которые являются результатом сведения множества малых по размеру исходных изображений в единое изображение галактики с одновременным переводом потоков в энергетические единицы.

Из архива Spitzer были также использованы калиброванные в энергетических единицах изображения, полученные 29 декабря 2003 года в сканирующем режиме на приборе MIPS в фильтре 24 μm [19]. В этом диапазоне используется матрица размером 128 \times 128 пикселей, с масштабом порядка 2''5 на пиксел.

Апертурная фотометрия изображений Spitzer проводилась с помощью программ MOREX/AREX. Апертурная поправка определялась по одиночным ярким звездам вблизи измеряемого объекта. Потоки от объектов приведены в Таблице 2, ошибки потоков не превышают 2–3%.

Объект N 125093 не удалось обнаружить на изображениях в фильтрах 70 и 160 μm камеры MIPS, а в остальных полосах он уверенно измеряется.

Измерения в фильтрах 3.6 и 4.5 μm для объекта N 45901 следует считать верхними пределами, т.к. на расстоянии 3''5 от него расположена соседняя звезда. Вклад от неё может быть значителен, поскольку средняя FWHM по полю составляет около 1.8 пикселя, а расстояние до нее на матрице менее 3 пикселей. Разделить компоненты возможно с помощью PSF-фотометрии, но для таких слабых звезд PSF-фотометрия позволит сделать только грубую оценку. В фильтрах 5.8 и 8.0 μm как объект, так и соседняя звезда теряется в шумах фона. На изображениях 24 μm объект не обнаружен.

Фотометрические измерения в фильтрах J (1.25 μm), H (1.65 μm) и K (2.17 μm) для объекта N 125093 были взяты из каталога 2MASS обзора всего неба [20]. Изображения галактики М 33 в обзоре были получены в декабре 1997 года. Для исследования спектрального распределения энергии N 125093 мы использовали неодновременные наблюдения, поскольку у нас нет надежной информации о переменности этого объекта. Данные для объекта N 45901 в каталоге 2MASS отсутствуют, на изображениях эта звезда выглядит как очень слабый точечный объект рядом с соседней звездой, более яркой в полосах 2MASS.

В каталоге переменных объектов в М 33 [21] у N 45901 (в этом каталоге его номер N 241989) заподозрена переменность в одном из трех фильтров MegaPrime/MegaCam телескопа CFHT (в полосе SDSS i'). Кроме того, оказалось, что звезда N 45901 совпадает с кандидатом в эмиссионные H α объекты из списка [22] (ее номер в этом списке N 44). По данным [22], звездная величина этого объекта V=18^m45, в то время как в каталоге [2] V=17^m57. Разница блеска $\Delta V \approx 0^m9$ между наблюдениями (1986–1987 гг. в [22]) и наблюдениями (2000–2001 гг. в [2]) вряд ли может быть объяснена ошибками калибровок. По этой причине весьма вероятно, что объект N 45901 действительно является переменной звездой.

Для объекта N 125093 звездная величина в разных каталогах (USNO-A2.0, USNO-B1.0, NOMAD Catalog, Guide Star Catalog версий 2.2 и 2.6) различается на 0^m65 в полосе V и на 2^m3 в полосе B. Естественно, различия в фотометрических системах, в том числе и с фотографическими, могут привести к заметному разбросу в оценках блеска. Тем не менее, различия оценок блеска настолько значительны, что необходимы дополнительные наблюдения, чтобы проверить факт возможной переменности блеска.

3. СПЕКТРЫ

Основной критерий, по которому мы относим эти два новых объекта к кандидатам в LBV-звезды, — широкие и сильные эмиссии в линии $H\alpha$, полуширина которых с учетом аппаратного контура (FWHM) составляет 1000 и 770 км/с для звезд N 125093 и N 45901 соответственно, а эквивалентная ширина — 36\AA и 38\AA . Кроме того, эмиссии $H\alpha$ у этих звезд имеют существенно более протяженные крылья. Скорее всего, что эти линии возникают в звездном ветре. Второй критерий — светимости звезд. По спектрам этих звезд (см. ниже) можно говорить о температуре фотосферы заведомо более высокой чем 10000 К. Наблюдаемые цвета звезд ($B - V = 0^m71$ и $B - V = 0^m85$ для N 45901 и N 125093 соответственно), а также наблюдаемые диффузные межзвездные полосы (DIBs) говорят о сильном межзвездном покраснении, т.е. о высокой истинной светимости этих кандидатов.

3.1. Кандидат N 125093

Спектр звезды N 125093 показан на Рис. 2 в сравнении со спектрами известных LBV-звезд в M 33 Var A, Var B, V 532 и нового весьма вероятного кандидата в LBV в этой галактике N 93351¹ [17]. Эмиссии He I в спектре этой звезды очень слабы, но заметны, самая яркая линия этого элемента ($\lambda 5876$) имеет низкую интенсивность. В красной области спектра видны слабые эмиссионные линии Fe II и несколько запрещенных линий [Fe II]. Из запрещенных линий ещё имеются эмиссии [O I] $\lambda\lambda 6300, 6360$ и слабые линии [N II] $\lambda\lambda 6548, 6384$ в крыльях широкой эмиссии $H\alpha$.

Очень интересны линии [Ca II] $\lambda\lambda 7291, 7323$, которые свидетельствуют о недавнем выбросе газа и сопряженной с ним пылевой активности [17]. Звезда Var A, в 1950-х годах была ярчайшей в M 33, позднее [24, 25] у нее появился инфракрасный избыток и яркие линии [Ca II]. Обычно эти линии не наблюдаются в классических LBV-звездах, они видны в холодных гипергигантах Var A в M 33 и IRC+10420 (однако звезда Var A по ряду признаков является типичной LBV-звездой, см. [17]). В поглощении видны линии Fe II в голубой области спектра, некоторые линии Ti II (как в спектре звезды N 93351) и две линии Si II $\lambda\lambda 6347, 6371$. Однако самая сильная линия

железа Fe II $\lambda 5169$ имеет эмиссионные компоненты в крыльях. В спектре N 125093 определенно видны диффузные межзвездные полосы поглощения (DIBs), дублет Na I $\lambda\lambda 5890, 5896$ так же достаточно силен. Эмиссия $H\beta$ в спектре N 125093 относительно слаба и не имеет широких крыльев при данном качестве спектра.

Мы провели Гаусс-анализ профиля эмиссии $H\alpha$ и нашли, что узкий компонент этой линии имеет полуширину FWHM = 5.9\AA , что не сильно отличается от нашего спектрального разрешения (5\AA), однако ее широкий компонент имеет FWHM = 22.5\AA , что соответствует дисперсии скоростей в истекающем ветре ≈ 1000 км/с после учета аппаратного профиля. Полуширина узкой компоненты линии $H\beta$ составляет 4.4\AA .

В щель спектрографа попали слабые и протяженные области H II, влияние которых учитывалось вычитанием спектра окружающего фона. Непосредственно вокруг N 125093 свечение H II очень слабо.

Для оценки межзвездного поглощения были использованы отношения потоков линий $H\alpha/H\beta$ для туманности, расположенной недалеко от звезды N 125093. Для газовых туманностей это отношение ≈ 2.87 в широком диапазоне температур и плотностей [26]. Мы использовали закон межзвездного покраснения из работы O'Donnell [27] при $R_V = 3.07$. Нами было получено значение $A_V \lesssim 2.5$, которое в дальнейшем используется при аппроксимации спектральных распределений энергии.

Из сравнения спектра N 125093 со спектрами относительно горячих звезд Var B и V 532 [17] можно сделать вывод, что температура фотосферы N 125093 заведомо ниже 20000 К. С другой стороны, из наличия глубоких абсорбций Si II можно заключить, что температура определенно выше 10000 К. Эквивалентная ширина линии Si II $\lambda 6347$ равна $0.48 \pm 0.02\text{\AA}$. В спектрах сверхгигантов более холодных чем A0, эквивалентная ширина этой линии равна 0.7\AA [28, 29], в более горячих сверхгигантах эквивалентная ширина становится меньше. По величине эквивалентной ширины линии Si II $\lambda 6347$ мы делаем вывод, что звезда принадлежит классу B5 - B7 и ее температура $\gtrsim 10000$ К. Спектр этой звезды весьма похож на спектр N 93351, температуру которой мы оценили ранее [17] 13000–16000 К. Здесь мы можем сделать грубую оценку температуры N 125093 по линиям спектра, $T \sim 12000 - 16000$ К. Эту оценку температуры, наряду с оценкой величины межзвездного поглощения мы будем использовать дальше при исследовании спектрального распределения энергии N 125093, где мы уточним как температуру, так и величину покраснения.

¹Спектр V 532 любезно предоставлен Szeifert [23] и получен с разрешением 1.2\AA . Все остальные спектры получены на одном и том же приборе SCORPIO [17]. Спектры звезд Var A, Var B при спектральном разрешении 12\AA , а спектр N 93351 при спектральном разрешении 5\AA .

3.2. Кандидат N 45901

Спектр звезды N 45901 показан на том же Рис. 2. К сожалению, из-за погодных условий нам не удалось получить спектр этой звезды с разрешением 5 Å, и даже имеющийся спектр с разрешением 12 Å имеет низкое отношение сигнал/шум. Тем не менее, в спектре N 45901 имеется яркая и широкая эмиссия $H\alpha$ с протяженными крыльями. Гаусс-анализ выявил двухкомпонентный профиль линии: яркое ядро и широкое основание. Исправленные за аппаратный профиль полуширины узкой и широкой компонент равны 140 км/с и 770 км/с соответственно. В крыльях $H\alpha$ видна запрещенная линия [N II]λ6584. Вторая линия дублета [N II], которая должна быть в 3 раза слабее первой, вероятно, теряется в ярком голубом крыле $H\alpha$. Имеются также запрещенные линии [O I]λλ6300, 6360, которые формируются в неразрешаемой области около звезды размером менее 4–5 пк (при принятом нами расстоянии масштаб в M33 равен 4.6 пк/"). Несмотря на низкое качество спектра, особенно в голубой области, в этом диапазоне видны линии поглощения Fe II и Ti II из наиболее сильных линий этих ионов. В красном диапазоне мы можем даже подозревать эмиссии [Fe II], в области короче линии $H\alpha$ видны две эмиссионные линии Fe II из наиболее сильных в этой области.

Исходя из наличия широкой и яркой эмиссии $H\alpha$, а также вероятного присутствия линий Fe II и Ti II мы можем грубо оценить, что температура фотосферы N 45901 не ниже 10000–12000 К. Линий He I мы не обнаружили, соответственно, ее температура вряд ли более 15000 К. Линий H II-области вокруг звезды N 45901 мы не обнаружили, возможно, это связано с низким качеством спектра. По этой причине далее мы будем оценивать температуру звезды и величину межзвездного поглощения по её спектральному распределению энергии без предварительной оценки покраснения.

4. Спектральные распределения энергии и параметры звезд

Прежде чем уточнить температуры и светимости этих звезд с помощью моделирования распределения энергии, мы можем оценить величины их межзвездного покраснения в галактике M33. Из спектров следует, что температуры фотосфер этих звезд не менее 10000 К, для сверхгигантов такая температура соответствует $(B - V)_0 = 0^m0$ при болометрической поправке $BC = -0^m3$ [30]. Наблюдаемые цвета звезд равны $(B - V) = 0^m71$ для N 45901 и $(B - V) = 0^m85$ для N 125093, следовательно, их величины межзвездного поглощения, соответственно, не менее чем $A_V = 2.2$ и 2.6. При

принятом нами модуле расстояния до M33 равном $(m - M)_0 = 24^m9$ [12] находим нижний предел светимости звезды N 45901 как $M_V = -9^m5$, $M_{bol} = -9^m8$ и $M_V = -9^m9$, $M_{bol} = -10^m2$ для звезды N 125093.

Для построения спектральных распределений энергии (SED) использовались данные оптической и ИК фотометрии из Табл. 2. Мы применяли чернотельное приближение для описания отдельных компонент: горячей звезды и одной или двух компонент излучения пыли. Верхняя граница температуры теплой компоненты пыли задавалась 1500 К, поскольку выше этой температуры пыль начинает испаряться.

Известно, что не имея априорной информации о температуре звезды и о величине межзвездного поглощения невозможно определить эти оба параметра независимо. Для объекта N 125093 у нас есть как предварительная оценка температуры звезды, так и оценка покраснения (13000–16000 К, $A_V \lesssim 2.5$), оцененные по спектру. Для объекта N 45901 у нас есть только оценка температуры фотосферы звезды (12000–15000 К). Действительно, спектры наших обеих звезд весьма подобны (Рис.2), следовательно, их температуры не должны сильно отличаться.

Спектральные распределения энергии показаны на Рис. 3. Падение интенсивности излучения в фильтре U связано с наличием бальмеровского скачка у этих звезд. Величина ослабления блеска в фильтре U примерно одинакова у обеих звезд. Это независимо подтверждает наш вывод, что температуры обеих звезд примерно одинаковы. При вписывании чернотельного спектра для горячего компонента (звезды) мы не использовали измерение, полученное в фильтре U. Мы допускаем, что фотометрические измерения R, I (и, возможно, J) могут быть искажены дополнительным вкладом свободно-свободного излучения ветра [17]. Однако, результат аппроксимаций показывает, что вклад этого излучения в этих звездах незначителен.

Светимость каждой компоненты SED вычислялась как площадь под соответствующим чернотельным спектром, а болометрическая светимость объекта определялась как сумма светимостей трех компонент. Наилучшие решения для этих звезд приведены в Табл. 3. На Рис. 3 начальные результаты фотометрии (неисправленные за поглощение) отмечены крестиками. Исправленные за поглощение ($A_V = 2.8$ для N 125093 и $A_V = 2.3$ для N 45901) измерения обозначены кружками. Ошибки отображают точность фотометрии. Если размер кружка больше чем ошибка измерения, усы ошибок не видны. Сплошными линиями показаны индивидуальные чернотельные компоненты (три для N 125093 и два для N 45901), а также сумма всех компонент.

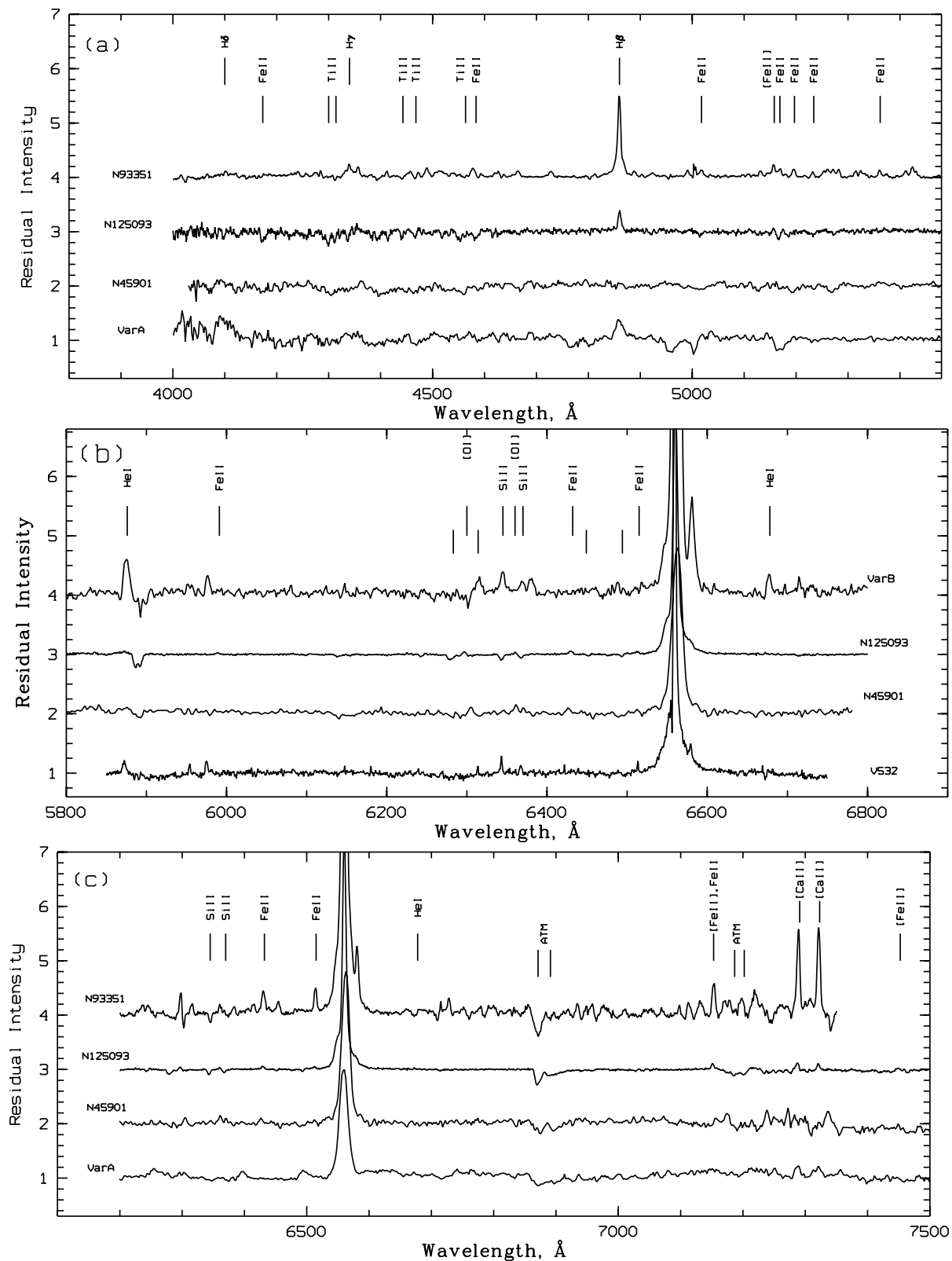


Рис. 2. Спектры кандидатов в LBV-звезды N 45901 и N 125093 совместно со спектрами известных LBV в галактике M 33 Var B и V 532 (a), Var A (LBV или красный гипергигант) и N 93351 (надежный кандидат в LBV) (b, c). У обоих новых кандидатов в LBV в спектрах присутствуют широкие эмиссионные линии $H\alpha$. Обозначены основные спектральные линии, найденные в спектрах кандидатов.

Для звезды N 125093 мы находим оптимальную величину межзвездного поглощения $A_V = 2.75 \pm 0.15$. Она близка к оценке, полученной нами по спектрам окружающего фона Н II ($A_V \lesssim 2.5$). Полученные параметры звезды для предельных значений $A_V=2.6$ и $A_V=2.9$ приведены в Табл. 3. Этим предельным величинам A_V соответствует температура фотосферы звезды $T_* \sim 13000-16000$ К, которая согласуется с нашей оценкой по спектру. Соответствующая болометрическая светимость объекта N 125093 равна $\log(L/L_\odot) = 6.3 - 6.6$. Мы находим две тепловые компоненты в спектре, теплую с $T_{\text{тепл}} \sim 1000$ К и холодную с $T_{\text{хол}} \sim 480$ К. Инфракрасный избыток у N 125093 составляет 5–6 % от болометрической светимости.

В случае объекта N 45901 мы находим оптимальную оценку величины межзвездного поглощения как $A_V = 2.3 \pm 0.1$. Соответственно, температура фотосферы этой звезды оценивается как $T_* \sim 13000-15000$ К, болометрическая светимость N 45901 равна $\log(L/L_\odot) = 6.0 - 6.2$. Инфракрасный избыток у N 45901 соответствует излучению теплой пыли с температурой $T_{\text{тепл}} \sim 1000$ К и составляет 0.1 % от болометрической светимости.

На Рис. 4 приведена диаграмма температура–светимость для всех известных LBV-звезд (Var B, Var C, Var 2, Var 83, V 532), а также звезд Var A и N 93351 в галактике М 33, параметры которых мы определили в нашей статье [17]. На диаграмме показаны два наших новых кандидата N 45901 и N 125093, а также эволюционные треки [31], рассчитанные для звезд с металличностью 0.007, соответствующей галактике М 33. Температуры и светимости всех звезд найдены единым методом аппроксимации спектральных распределений энергии с привлечением дополнительной информации о температурах звезд и величинах межзвездного поглощения, полученной из спектров. Для большинства звезд показаны граничные значения температур, которые еще удовлетворяют аппроксимации спектральных распределений энергий при найденной величине межзвездного поглощения. В случае звезд Var 83, Var A, N 93351 показаны параметры при двух граничных значениях межзвездного поглощения, поэтому область допустимых параметров (L, T) образуют замкнутую область.

Из этой диаграммы мы находим оценки масс звезд на начальной главной последовательности. Масса звезды N 45901 оценивается как $\sim 60-80 M_\odot$, масса N 125093, соответственно, равна $\sim 90-120 M_\odot$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Яркие голубые переменные характеризуются сильной и разнообразной переменностью

Таблица 2. Наблюдаемые параметры двух новых LBV-кандидатов. В первых двух строках даны координаты звезд, U, B, V, R, I величины взяты из [2], данные J, H, K из [20], в последних пяти строках представлены результаты нашей фотометрии, выполненной по изображениям Spitzer. Ошибки этой фотометрии не превышают 2–3 %.

	N 45901	N 125093
Ra (J2000)	01:33:27.40	01:34:15.42
Dec (J2000)	+30:30:29.5	+30:28:16.4
U (mag)	18.509 ± 0.004	18.383 ± 0.004
B (mag)	18.279 ± 0.004	18.138 ± 0.004
V (mag)	17.572 ± 0.004	17.284 ± 0.004
R (mag)	17.193 ± 0.004	16.755 ± 0.004
I (mag)	16.807 ± 0.004	16.203 ± 0.005
J (mag)	–	15.385 ± 0.041
H (mag)	–	14.819 ± 0.062
K (mag)	–	14.120 ± 0.048
$3.6\mu\text{m}$ (mJy)	3.17×10^2 ^a	3.11×10^3
$4.5\mu\text{m}$ (mJy)	1.45×10^2 ^a	3.69×10^3
$5.8\mu\text{m}$ (mJy)	–	4.09×10^3
$8.0\mu\text{m}$ (mJy)	–	6.35×10^3
$24.0\mu\text{m}$ (mJy)	–	2.00×10^4

^aЭти измерения мы считаем верхними пределами, из-за наличия близкой звезды

Таблица 3. Результаты моделирования спектральных распределений энергии. Для каждой звезды приведены два предельных варианта допустимых значений параметров величины межзвездного поглощения и соответствующих им болометрическим светимостям и температурам горячих компонентов (звезд) в К. В двух последних колонках приведены температуры теплой и холодной пылевых компонент и в скобках их процентный вклад в болометрическую светимость.

Объект	A_V	$\log L/L_\odot$	T_*	$T_{\text{тепл}}$	$T_{\text{хол}}$
N 45901	2.2	6.02	13200	1000(0.1)	
	2.4	6.21	15200	1000(0.1)	
N 125093	2.6	6.30	12700	1400(3.9)	480(3.2)
	2.9	6.60	16200	1400(2.0)	470(1.6)

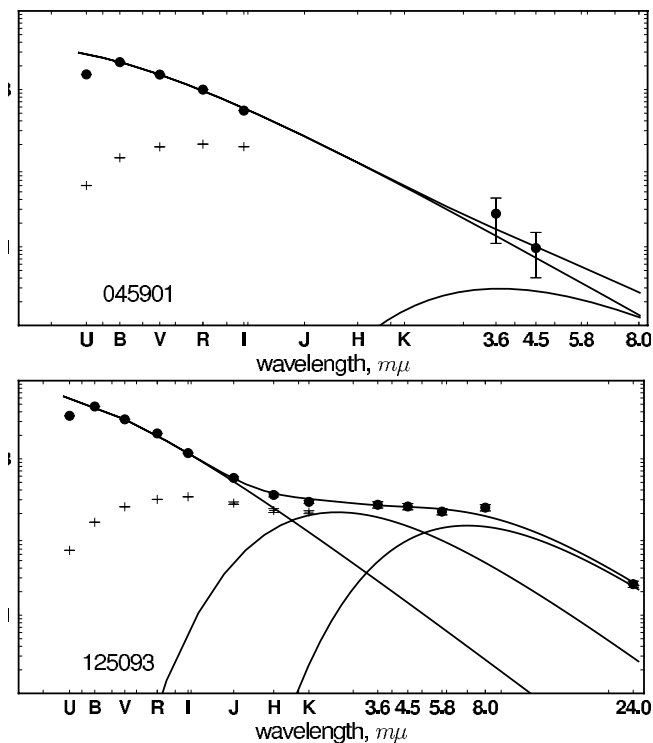


Рис. 3. Спектральные распределения энергии двух новых LBV-кандидатов в М33. Результаты фотометрии неисправленные за поглощение указаны крестиками. Исправленные за поглощение (для N 45901 $A_V = 2.3$ и для N 125093 $A_V = 2.8$) измерения обозначены кружками. Ошибки отображают точность фотометрии. Если размер кружка больше, чем ошибка измерения, усы ошибок не видны. Сплошными линиями показаны отдельные чернотельные компоненты излучения, а также сумма всех компонент.

блеска [8]. Переменность большой амплитуды (более 1^m) редка среди классических LBV, такие события могут происходить на временной шкале десятки лет. Например, прототип LBV — звезда Р Cyg, продемонстрировавшая гигантское увеличение блеска, имеет относительно стабильный блеск последние три столетия. Фактически, любой новый кандидат в LBV-объекты будет оставаться только “кандидатом в LBV” до тех пор пока её переменность блеска не достигнет большой амплитуды (вероятно, не менее чем 0.3–0.5 звездной величины, так как переменность блеска 0.1–0.2 величины является обычной для массивных сверхгигантов). На ожидание проявления сильной переменности блеска могут уйти десятки и сотни лет. Независимо от спектра, температуры или светимости, независимо от того какие “типичные для LBV” параметры обнаруживаются у того или иного кандидата в LBV, такой объект останется кандидатом.

Надеемся, что такая ситуация в физике LBV-объектов не будет долгой. Будут найдены более на-

дежные критерии и классификации для класса LBV и вообще этой стадии эволюции массивной звезды. Надежным критерием, вероятно, будет химический состав атмосферы, то есть относительное содержание водорода и гелия. Измерение содержаний требует анализа спектра на основе моделей расширяющихся атмосфер. Действительно, известная звезда LBV Галактики AG Car имеет содержание $\text{He}/\text{H} = 0.43$, что было получено в результате детального моделирования ее спектра [32]. Известна связь между LBV-звездами и поздними WR-звездами азотной последовательности с водородом в оболочках WNLh (см. Введение), у которых наблюдается пониженное содержание водорода в ветре. Очевидно, что для понимания физики и эволюционного статуса LBV-объектов необходимо обнаружение большого количества объектов со свойствами подобными LBV.

В этой работе представлено предварительное исследование двух новых LBV-кандидатов в галактике М33, которые были найдены нами в результате спектральных наблюдений из списка звезд-кандидатов в эмиссионные объекты с заметным межзвездным поглощением [1]. Спектры звезд N 45901 и N 125093 подобны спектрам звездам на стадии LBV, они имеют сильные и широкие эмиссии $H\alpha$, запрещенные линии [O I] и [N II]. В спектре второй звезды присутствуют эмиссионные линии [Ca II], [Fe II], Fe II, абсорбции Ti II и Fe II. Спектр первой звезды недостаточного качества для надежного отождествления, однако в ее спектре имеются линии [O I], Fe II и Ti II. Необходимо получить дополнительные спектры с лучшим разрешением и отношением сигнал/шум, чтобы более надежно изучить спектр. Сравнения измерений звездных величин в различных каталогах указывает на вероятную переменность объекта N 45901.

У обеих звезд нами обнаружены инфракрасные избытки, у звезды N 125093 (у нее имеются эмиссии [Ca II]) температуры теплой и холодной пылевых компонент составляют 1400 К и 470 К соответственно.

Мы оцениваем, что звезда N 45901 имеет болометрическую светимость $\log(L/L_\odot) = 6.0 - 6.2$ и ее вероятная масса на начальной главной последовательности $M \sim 60 - 80 M_\odot$. Светимость N 125093 составляет $\log(L/L_\odot) = 6.3 - 6.6$ и его начальная масса $M \sim 90 - 120 M_\odot$. Все эти свойства N 45901 и N 12509 позволяют причислить их к кандидатам в LBV.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Т. А. Фатхуллина за помощь в наблюдениях и Е. Л. Ченцова за помощь в спектральной классификации. Работа была выполнена

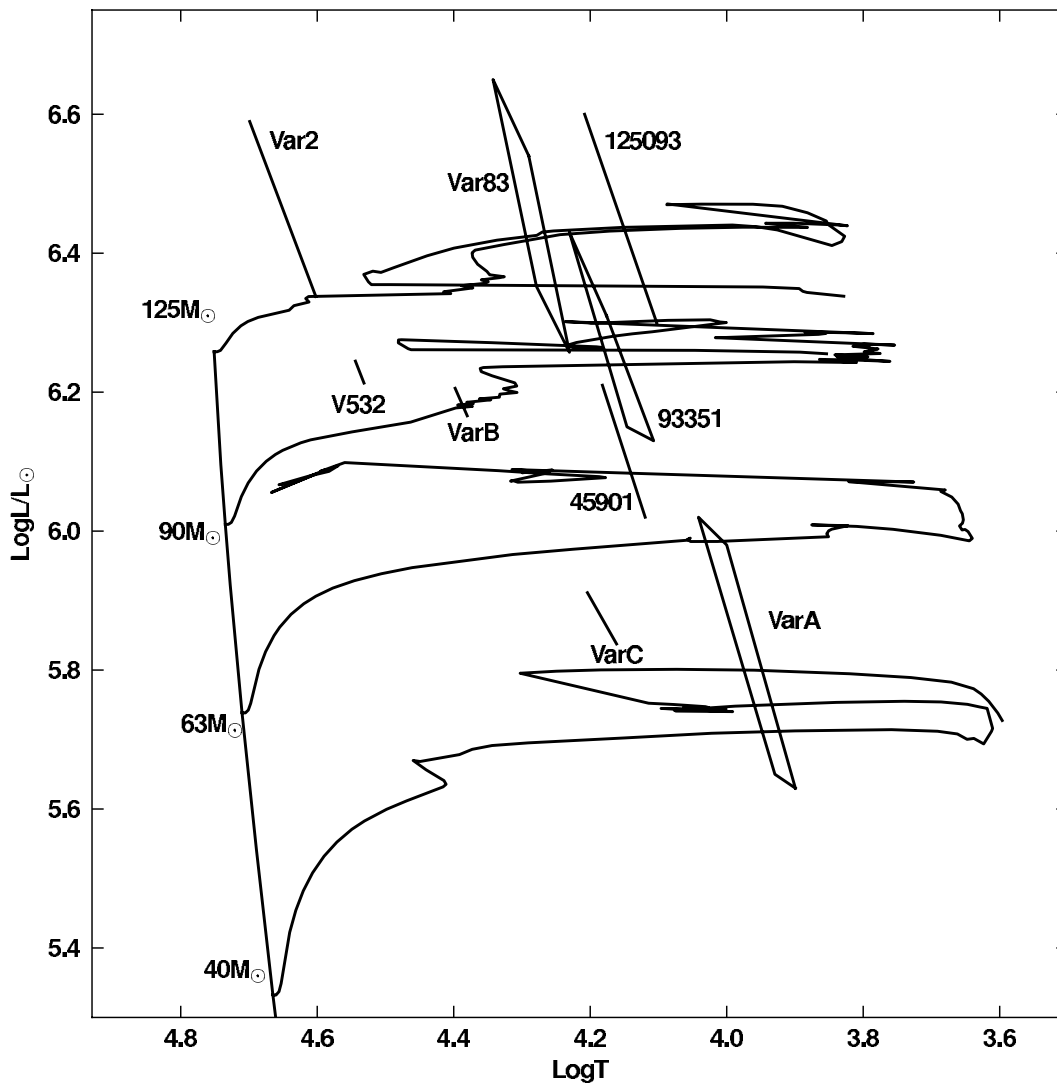


Рис. 4. Диаграмма температура—светимость для всех известных LBV-звезд (Var B, Var C, Var 2, Var 83, V 532), а также звезд Var A и N 93351 из галактики M 33 (данные взяты из статьи [17]), на которую помещены два новых кандидата N 45901, N 125093. Эволюционные треки, рассчитанные для металличности $Z=0.007$, заимствованы из статьи [31]. Указаны области возможных величин L и T .

при поддержке грантов РФФИ № 09-02-00163 и № 10-02-00463, гранта "Ведущие научные школы России" № 5473.2010.2 и ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 - 2013 годы, № П1244.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. F. Valeev, O. Sholukhova, and S. Fabrika, *Astrophysical Bulletin* **65**, 140 (2010).
2. P. Massey, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, et al., *Astronom. J.* **131**, 2478 (2006).
3. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **106**, 1025 (1994).
4. G. Meynet, P. Eggenberger, and A. Maeder, *IAU Symposium* №241, La Palma, Spain, 2006, p. 13
5. N. Smith and P. S. Conti, *Astrophys. J.* **679**, 1467 (2008).
6. S. Fabrika, O. Sholukhova, T. Becker, et al., *Astronom. and Astrophys.* **437**, 217 (2005).
7. G. Koenigsberger, L. Georgiev, D. J. Hillier, et al., *Astronom. J.* **139**, 2600 (2010).
8. A. M. van Genderen, *Astronom. and Astrophys.* **366**, 508 (2001).
9. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, and S. Fabrika, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **405**, 1047 (2010).
10. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, S. Fabrika, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **405**, 520 (2010).
11. D. Zaritsky, R. Elston, and J. M. Hill, *Astronom. J.* **97**, 97 (1989).
12. A. Z. Bonanos, K. Z. Stanek, R. P. Kudritzki, et al., *Astrophys. J.* **652**, 313 (2006).
13. J. S. Clark, V. M. Larionov, and A. Arkharov, *Astronom. and Astrophys.* **435**, 239 (2005).

14. P. Massey, R. T. McNeill, K. A. G. Olsen, et al., *Astronom. J.* **134**, 2474 (2007).
15. S. Fabrika and O. Sholukhova, *Astrophys. J. Suppl.* **140**, 309 (1999).
16. К. У. Аллен, *Астрофизические величины*. (М. Мир, 1977).
17. A. F. Valeev, O. Sholukhova, and S. Fabrika, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **396**, L21 (2009).
18. G. G. Fazio, J. L. Hora, L. E. Allen, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154**, 10 (2004).
19. G. H. Rieke, E. T. Young, C. W. Engelbracht, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154**, 25 (2004).
20. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, et al., *2MASS All Sky Catalog of point sources*. (2003).
21. J. D. Hartman, D. Bersier, K. Z. Stanek, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **371**, 1405 (2006).
22. D. Calzetti, A. L. Kinney, H. Ford, et al., *Astronom. J.* **110**, 2739 (1995).
23. T. Szeifert, O. Stahl, B. Wolf, et al., *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* **10**, 36 (1994).
24. R. M. Humphreys, T. J. Jones, and R. D. Gehrz, *Astronom. J.* **94**, 315 (1987).
25. R. M. Humphreys, T. J. Jones, E. Polomski, et al., *Astronom. J.* **131**, 2105 (2006).
26. D. E. Osterbrock and G. J. Ferland, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (Univ. Sci. Books, Sausalite, 2006).
27. J. E. O'Donnell, *Astrophys. J.* **422**, 158 (1994).
28. E. L. Chentsov and A. N. Sarkisyan, *Astrophysical Bulletin* **62**, 257 (2007).
29. P. Didelon, *Astrophys. J. Suppl.* **50**, 199 (1982).
30. P. J. Flower, *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996).
31. A. Claret, *Astronom. and Astrophys.* **453**, 769 (2006).
32. J. H. Groh, D. J. Hillier, A. Daminieli, et al., *Astrophys. J.* **698**, 1698 (2009).

TWO NEW LBV CANDIDATES IN THE M 33 GALAXY

A. F. Valeev, O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika

We present two new luminous blue variable (LBV) candidate stars discovered in the M 33 galaxy. We identified these stars (Valeev et al. [1]) as massive star candidates at the final stages of evolution, presumably with a notable interstellar extinction. The candidates were selected from the Massey et al. catalog [2] based on the following criteria: emission in $H\alpha$, $V_j 18^m 5$ and $0^m 35 < (B - V) < 1^m 2$. The spectra of both stars reveal a broad and strong $H\alpha$ emission with extended wings (770 and 1000 km/s). Based on the spectra we estimated the main parameters of the stars. Object N 45901 has a bolometric luminosity $\log(L/L_\odot) = 6.0 - 6.2$ with the value of interstellar extinction $A_V = 2.3 \pm 0.1$. The temperature of the star's photosphere is estimated as $T_* \sim 13000 - 15000$ K, its probable mass on the Zero Age Main Sequence is $M \sim 60 - 80 M_\odot$. The infrared excess in N 45901 corresponds to the emission of warm dust with the temperature $T_{\text{warm}} \sim 1000$ K, and amounts to 0.1 % of the bolometric luminosity. A comparison of stellar magnitude estimates from different catalogs points to the probable variability of the object N 45901. Bolometric luminosity of the second object, N 125093, is $\log(L/L_\odot) = 6.3 - 6.6$, the value of interstellar extinction is $A_V = 2.75 \pm 0.15$. We estimate its photosphere's temperature as $T_* \sim 13000 - 16000$ K, the initial mass as $M \sim 90 - 120 M_\odot$. The infrared excess in N 125093 amounts to 5–6 % of the bolometric luminosity. Its spectral energy distribution reveals two thermal components with the temperatures $T_{\text{warm}} \sim 1000$ K and $T_{\text{cold}} \sim 480$ K. The [Ca II] $\lambda\lambda 7291, 7323$ lines, observed in LBV-like stars Var A and N 93351 in M 33 are also present in the spectrum of N 125093. These lines indicate relatively recent gas eruptions and dust activity linked with them. High bolometric luminosity of these stars and broad $H\alpha$ emissions allow classifying the studied objects as LBV candidates.

Key words: *stars: massive*