

ЭВОЛЮЦИЯ ОСТАТКА КРАСНОЙ НОВОЙ V4332 СТРЕЛЬЦА

© 2014 Е. А. Барсукова^{1*}, В. П. Горанский², А. Ф. Валеев¹, А. В. Жарова²

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119992, Россия

Поступила в редакцию 30 сентября 2013 года; принята в печать 11 ноября 2013 года

В работе представлены многоцветные фотометрические наблюдения в системе *BVRI* и спектроскопия БТА/SCORPIO красной новой V4332 Sgr, выполненные в 2005–2013 гг. Мы анализировали поведение остатка новой, рассматривая наши данные в совокупности со всеми опубликованными наблюдениями и архивной фотографической фотометрией. Атомарный и молекулярный эмиссионные спектры показывают ослабление по экспоненциальному закону. Потоки в линиях уменьшились с 2003 г. в среднем в 30 раз. Континуум М-гиганта в спектре ослабел скачком за 2006–2008 гг. в два раза в красном и в четыре раза в синем диапазоне. Изменения распределения энергии в континууме звезды после вспышки соответствуют понижению поверхностной температуры М-гиганта на 1000 К. Возможно присутствие слабой звезды около 20^m , которая может быть либо членом системы, либо звездой поля. Установлено, что феномен красной новой в этой системе не связан с М-звездой. Предшественником взрыва может быть голубой страгглер, который исчез из спектрального распределения энергии после взрыва 1994 г. Наиболее вероятно, что этот объект был контактной системой. Для объяснения “холодного взрыва” V4332 Sgr мы приняли гипотезу о слиянии компонентов контактной двойной звезды в иерархической тройной или кратной системе. Есть свидетельства динамического разрушения остатка взрыва и аккреции его вещества на М-гигант. Причиной феномена красной новой считается внезапное энерговыделение в центре звезды с массивной оболочкой и последующее расширение оболочки в режиме, близком к адиабатическому. В результате тепловая энергия взрыва доходит до поверхности оболочки за год или несколько лет, в то время, когда оболочка уже имеет большую площадь поверхности. Причиной взрыва в центре звезды может быть как слияние ядер двух звезд в контактной системе со сформировавшейся массивной общей оболочкой, так и неустойчивость в ядре молодой массивной звезды. Таким образом, красные новые могут быть разнородными объектами в разных стадиях эволюции.

Ключевые слова: *новые, катаклизмические переменные—звёзды: эволюция—звёзды: внутреннее строение—звёзды: индивидуальные: V4332 Sgr, V838 Mon*

1. ВВЕДЕНИЕ

Вспышка Новой Стрельца 1994 г. (V4332 Sgr) была открыта 24 февраля 1994 г. М. Ямомото [1]. Блеск звезды в тот момент составлял 8^{m9} . Первые спектральные наблюдения Р. Бертрама [2] обнаружили во вспышке очень холодный континуум и эмиссию $H\alpha$, что совершенно нетипично для классических новых. Вспышка была открыта в то время, когда объект был расположен в стороне Солнца, и потому не наблюдалась полностью. Спектральное и фотометрическое исследование V4332 Sgr во вспышке и на спаде блеска содержится в работе [3]. Уже через 20 дней после открытия начался быстрый спад блеска, при этом спектральный класс менялся от K3–K4 III–I до

M8–M9 III с молекулярными полосами TiO и VO. Затем появились эмиссии: сначала бальмеровские линии, а позднее Na I, Fe I, Fe II, [O I] и сильная линия Mg I $\lambda 4571$. Дополнительные свидетельства присутствия источника ионизирующего излучения высокой температуры — запрещенные линии [Fe II] — в спектре 5 июня 1994 г. отмечены в [4].

По холодному континууму в спектре вспышки и по развитию вспышки V4332 Sgr напоминала красную переменную звезду RV (McD 88 No. 1, V1006/7), появившуюся в балдже туманности Андромеды M 31 в 1988 г. [5–7]. В максимуме блеска она достигла абсолютной величины $M_V = -9^{m1}$, что превышает абсолютные величины классических новых в M 31. Затем были открыты еще три галактических объекта со спектрами классов K–M во вспышках: V838 Mon 2002 г. [8, 9], V1309 Sco 2008 г. [10, 11] и OGLE-2002-BLG-360 [12]. В

*E-mail: bars@sao.ru

настоящее время надежно определено расстояние до V838 Mon (6.1 ± 0.6 кпк) и абсолютная величина этой звезды в максимуме вспышки ($M_V = -9^m8$) [13]. Еще один галактический объект такого класса был найден в архивах — это V1148 Sgr [14, 15], однако сведения о нем крайне скудны. Стали известны еще два внегалактических объекта: M 85 OT 2006-1 [16] и PTF 10fqс в галактике M 99 [17], которые, возможно, относятся к этому классу. Их абсолютные величины в максимумах блеска составляют соответственно $M_R = -12^m$ и $M_V = -13^m$. Так что V4332 Sgr оказалась представителем нового класса астрофизических объектов — звезд, которые при взрывах превращаются в холодные сверхгиганты (Stars Erupting into Cool Supergiants, SECS [18]), или красных новых. По светимости в максимуме блеска красные новые попадают в промежуток между классическими новыми звездами и сверхновыми (-8^m и -17^m) [19]. Еще их называют красными транзиентами промежуточной светимости (Intermediate-Luminosity Red Transients, ILRT). Среди красных новых встречаются объекты разных типов населения галактик: как старого населения балджа и гало (V1006/7 в M 31, M 85 OT 2006-1), так и молодого населения спиральной ветви Галактики (V838 Mon).

V4332 Sgr, будучи относительно хорошо исследованным объектом, таит в себе много загадок. Он появился на высокой галактической широте ($b = -9^\circ4$) в направлении на галактический центр ($l = 13^\circ6$) и имеет малое межзвездное покраснение ($E(B - V) = 0^m32$). Если принять для него абсолютную величину в пике вспышки, известную для V1006/7 в M 31 или V838 Mon, получается, что это очень далекий объект ($d = 15-22$ кпк), расположенный за галактическим центром. По другим оценкам расстояние принималось в 0.3 кпк или меньше [3] или 1.8 кпк [21]. По архивной фотометрии POSS-I 1950 г. в полосах B и R для предшественника взрыва были определены спектральные классы G2 (± 0.4 подкласса) [20] или G6V [21], где он считался “звездой типа Солнца.” В московской коллекции фотографий неба были обнаружены шесть снимков, полученных между 1980 и 1986 гг. на 50-см менисковом телескопе системы Максудова в системе BV , по которым определены следующие фотометрические параметры: $V = 17^m63$, $B - V = 0^m58 \pm 0^m11$, $(B - V)_0 = 0^m26$ [22]. В совокупности с наблюдением в полосе R по пластинке, полученной на телескопе Шмидта в ESO в 1985 г., и в полосе I на Паломарском телескопе Шмидта в 1987 г., из фотографических наблюдений следует, что предшественник содержал голубой и красный компоненты. К тому же наблюдения из обзоров неба

показали, что блеск предшественника в полосе B увеличился на 1^m между 1950 и 1986 гг., а в полосе R — на 2^m6 между 1950 и 1991 гг. [20]. В 2005 г. в спектральном распределении энергии V4332 Sgr голубой компонент уже отсутствовал, а в спектрах не было следов какого-либо источника ионизации. Но красный компонент в 2005 г. оставался приблизительно на том же уровне светимости, что и в 1985–1986 гг. Из данных фотометрии в [22] был сделан вывод, что предшественник V4332 Sgr был двойной системой, в которой произошел взрыв горячего компонента.

Спектроскопические наблюдения остатка взрыва 1994 г. начались только в 2002 г., с задержкой в восемь лет [20]. Спектр остатка V4332 Sgr оказался необычным: кроме континуума холодной звезды класса K8–M0 в нем видны эмиссионные линии низкого возбуждения металлов и молекулярные эмиссии разреженного холодного газа с температурой 1050 K [20]. В 2003 г. спектр холодной звезды оценивался как M2.7 I [21]. В спектре сильны эмиссии щелочных металлов Na, K и Rb, а бальмеровские линии отсутствуют. В эмиссии наблюдаются резонансные линии Al I, Mn I, Cr I, Ca I, Sr I, линии Mg I, Fe I, молекулярные линии AlO, TiO, VO, ScO и CrO [4, 20, 21, 23–25]. Механизм излучения газовой туманности в молекулярных и атомарных эмиссиях может быть радиативным возбуждением (radiative pumping) от континуума холодной звезды [25].

В 2009 г. фотосферный спектр холодной звезды оценивался как M6.2 III [25]. К этому времени спектр изменился и стал более поздним по сравнению со спектром 2003 г. Это связано с фотометрическим ослаблением звезды в период между 2006 и 2008 гг. В то же время отмечалось, что спектр холодной звезды отличался от спектров обычных звезд типа M6 III дополнительными абсорбционными полосами VO 7334–7534 Å и TiO 6985–7050 Å. Эти полосы наблюдаются только у M-звезд более ранних подклассов. Возможно, эти полосы свидетельствуют о низкой металличности холодной звезды.

В 2003 г. в инфракрасном (ИК) спектре V4332 Sgr произошли существенные изменения: в дополнение к распределению энергии холодной звезды, которая представлялась распределением с температурой абсолютно черного тела 3250 K, появился сильный ИК избыток излучения в полосах системы JHK с температурой 900 K [26]. Увеличение яркости в ИК диапазоне было отмечено также в [21]. Этот избыток появился, вероятно, за короткое время, т. к. в 1998 г. по данным обзора неба 2MASS он отсутствовал, а через год был отмечен при обзоре DENIS. Избыток излучения может быть связан с пылевой оболочкой, нижний

предел массы которой $3.7 \times 10^{-12} M_{\odot}$. Данные разных обзоров неба в диапазоне $0.4\text{--}105 \mu\text{m}$, собранные в [25], в период с 2005 по 2009 гг. показывают два спектральных компонента с чернотельными температурами 950 К и 200 К, которые в сумме превышают по светимости холодную звезду примерно в 50 раз. В работе [25] предполагается, что такое распределение энергии может иметь гигант класса М5–6, окруженный толстым газопылевым диском, наклоненным к лучу зрения на угол, близкий к 90° . Так что центральная звезда-гигант погружена в этот диск, и лишь ничтожная часть излучения звезды попадает к наблюдателю, рассеиваясь на пылевых частицах. Авторы этой работы сравнивают V4332 Sgr с объектом IRAS 1809–3211 (известным как “Гамбургер Гомеса”), распределение энергии которого похоже на распределение энергии V4332 Sgr. Там свет центральной звезды, которая экранирована и не видна напрямую, рассеивается пылевыми частицами на внешнем крае диска. В рамках этой гипотезы остается нерешенной проблема формирования атомного и молекулярного спектра холодного газа, так как излучение центральной звезды не достигает этого края. К тому же низкие вращательные температуры, измеренные по молекулярным эмиссиям, предполагают значительные расстояния от центральной звезды до облака холодного газа, из чего следует, что этот газ не связан с толстым диском, а был выброшен в прошлом, при вспышке 1994 г. или позднее звездным ветром. Поскольку профили атомных линий не раздвоены, считалось, что истечение газа концентрируется к оси, перпендикулярной лучу зрения. В работе [27] была измерена линейная поляризация V4332 Sgr. Степень поляризации составила примерно 26% в полосе V и 11% в полосе R . В предположении, что поляризовано только излучение центральной звезды, и вклад атомарной и молекулярной эмиссии в обе полосы составляет около 40%, степень поляризации континуума должна быть около 40% и 20% в полосах V и R соответственно. Столь высокие степени поляризации должны свидетельствовать в пользу модели с красным гигантом, погруженным полностью в толстый пылевой диск, и с возможными истечениями молекулярного и атомного газа вдоль оси этого диска.

Отметим, что в настоящее время существуют по крайней мере три гипотезы, объясняющие феномен красных новых. Это может быть “ядерное событие в одиночной проэволюционировавшей звезде, при котором медленный толчок передается фотосфере звезды, и она расширяется с увеличением светимости и, соответственно, с уменьшением эффективной температуры” [3]. Так впервые объяснялась вспышка V4332 Sgr. Мы понимаем это “событие”

как взрыв или внезапное кратковременное увеличение энергетического выхода из центра звезды по разным причинам. В случае V838 Mon мы, возможно, имеем дело с центральным взрывом у молодой звезды начальной главной последовательности класса В3 V в системе со спутником класса В3 V, после чего этот спутник оказался внутри расширяющегося сверхгиганта — остатка взрыва [28]. Другое объяснение феномена красной новой — столкновение или слияние звезд в двойных или кратных системах [29]. Слияние компонентов контактной системы с формированием общей оболочки наблюдалось у красной новой V1309 Sco по архивным снимкам неба эксперимента OGLE [11]. Третья гипотеза рассматривает красные новые как экстремальный случай классических новых — карликовых систем, подобных новым, но с маломассивными и холодными белыми карликами с медленным темпом аккреции [30, 31]. При этом вспышка новой связана с термоядерным взрывом водорода на поверхности белого карлика и с последующим расширением его фотосферы. Последняя гипотеза встречается с трудностями: белые карлики или карликовые системы у предшественников красных новых еще не обнаружены.

По нашему мнению, не только архивные исследования предшественников красных новых, но и исследования их остатков могут дать ценную информацию о природе этого феномена.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектроскопические наблюдения V4332 Sgr проводились в CAO РАН на 6-м телескопе БТА с фокальным редуктором SCORPIO [32] в период между 8 июня 2005 г. и 17 августа 2012 г. Информация о полученных спектрах дана в таблице. Обработка спектров выполнена в ОС Linux с использованием контекста LONG среды ESO MIDAS. В CAO V4332 Sgr может наблюдаться только на больших зенитных расстояниях — во всех случаях оно превышало 65° . Для уменьшения потерь света из-за атмосферной дифференциальной рефракции в коротковолновой части спектра щель камеры располагалась перпендикулярно горизонту. В $9''$ к югу от V4332 Sgr расположена звезда, имеющая блеск $V = 13^{\text{m}}30$ [22], которая частично или полностью попадала в щель. Ее яркость в фильтре V превышала яркость V4332 Sgr в 600 раз. По этой причине некоторые спектры V4332 Sgr искажены влиянием рассеянного света этой яркой звезды. Отношение сигнал/шум в спектрах V4332 Sgr меняется в полосах V и R (в континууме примерно на 5500 \AA и 6400 \AA) в пределах 25–100. В области $\lambda > 6800 \text{ \AA}$ спектры искажены фрингами, и нам не во всех случаях

Журнал спектральных наблюдений V4332 Sgr на БТА/SCORPIO

Дата	HJD 2400000+	Экспозиция, с	Диапазон, Å	Разрешение, Å	Гризма
June 08, 2005	53530.486	2700	3900–5619	4.6	VPHG 1200g
June 09, 2005	53531.489	2700	3900–5616	4.6	VPHG 1200g
August 04, 2006	53896.472	2400	5630–7366	5.0	VPHG 1200r
July 19, 2007	54301.337	1200	5640–7361	5.0	VPHG 1200r
	54301.395	3000	3802–7556	10.0	VPHG 500g
June 05, 2011	55718.466	2400	5744–7299	5.0	VPHG 1200r
June 06, 2011	55719.453	2400	3900–7897	10.0	VPHG 500g
August 17, 2012	56157.332	4500	3883–7910	10.0	VPHG 500g

удалось их скомпенсировать. В цифровом виде спектры доступны в Интернете по адресу: <http://jet.sao.ru/~bars/spectra/v4332sgr/>.

Многоцветные фотометрические наблюдения V4332 Sgr в фильтрах *UBVRI* Джонсона и *RI* Козинса проводились в течение десяти лет в период с 28 мая 2003 г. по 13 июля 2013 г. на разных телескопах и ПЗС-фотометрах. В CAO РАН наблюдения проводились на 1-м телескопе Цейсса с фотометром, работающим в системе *UBV(RI)_C*. В фотометре используется ПЗС-матрица EEV 42–40, которая охлаждается жидким азотом до температуры -135°C . Наблюдения проводились также на Крымской станции ГАИШ МГУ (Украина). Там использовались 60-см телескоп Цейсса с фотометром, работающим в системе *BVR_CR_JI_J*, с ПЗС-матрицами SBIG ST-7 и Arogee-47 в фокусе Кассегрена, и 50-см менисковый телескоп системы Максудова АЗТ-5 с ПЗС-матрицей Meade Pictor-416 и фильтром в системе *V*, установленными в прямом фокусе. Обработка крымских наблюдений производилась с учетом кадров плоского поля (flat field), нулевой экспозиции (bias) и темного сигнала (dark). Для обработки наблюдений, полученных в CAO, использовались только кадры flat field и bias, так как при охлаждении азотом до низких температур темновой сигнал не отличался от нуля. Мы использовали для фотометрии также кадры в полосах *BVR_C*, полученные на БТА с камерой SCORPIO при спектроскопических наблюдениях. Все наблюдения были обработаны с использованием программы В. П. Горанского WinFITS в ОС Windows. При фотометрической обработке соседняя звезда в $9''$ к югу проблемы не представляла. Фон этой звезды измерялся на том же расстоянии от ее центра, на котором расположен исследуемый объект. В некоторых

случаях, при изображениях близких к $3''$ или более, ореол вокруг звезды был представлен радиально симметричной функцией яркости и вычитался. По одновременным наблюдениям мы определили для V4332 Sgr поправки для перехода от системы Джонсона к системе Козинса: $R_C = R_J + 0^{\text{m}}40$ и $I_C = I_J + 0^{\text{m}}60$, не зависящие от показателей цвета. Так что здесь все наблюдения в фильтрах *R* и *I* приведены к системе Козинса.

В нашей коллекции фотометрических наблюдений используются также данные из работ [3, 20, 21, 33]. В эти данные были внесены поправки для приведения в фотометрическую систему, близкую к системе фотометра CAO РАН. Поправки для перехода в единую систему (CAO РАН) были определены по одновременным или близким по времени наблюдениям. Коллекция доступна в Интернете по адресу: <http://jet.sao.ru/~goray/v4332sgr.ne3>. Кривые блеска можно рассмотреть в деталях на этом же сайте по ссылке <http://jet.sao.ru/~goray/v4332sgr.htm> с помощью браузера, совместимого с Java.

Кривые блеска V4332 Sgr за десять лет (2003–2013 гг.) в полосах *BVR_CI_C* представлены на Рис. 1. Доминирующей особенностью кривых в оптическом диапазоне является спад блеска, который произошел между 2006 и 2008 гг. В полосе *B* блеск упал от $19^{\text{m}}4$ до $21^{\text{m}}4$, то есть на $2^{\text{m}}0$; в полосе *V* — от $17^{\text{m}}4$ до $19^{\text{m}}8$, на $2^{\text{m}}4$; в полосе *R_C* — от $16^{\text{m}}2$ до $18^{\text{m}}0$, на $1^{\text{m}}8$. В ближнем ИК диапазоне, в полосе *I_C*, падение блеска в это время заметно меньше и составляет не более $0^{\text{m}}4$. Есть наблюдение в этом фильтре, относящееся к 1999 г. [20] (из обзора DENIS). С учетом этого наблюдения можно сделать вывод о постепенном падении блеска *I* с 1999 по 2010 гг. на $1^{\text{m}}1$, а затем заметен подъем блеска на величину около $0^{\text{m}}2$. Небольшой подъем блеска в 2011–2013 гг.

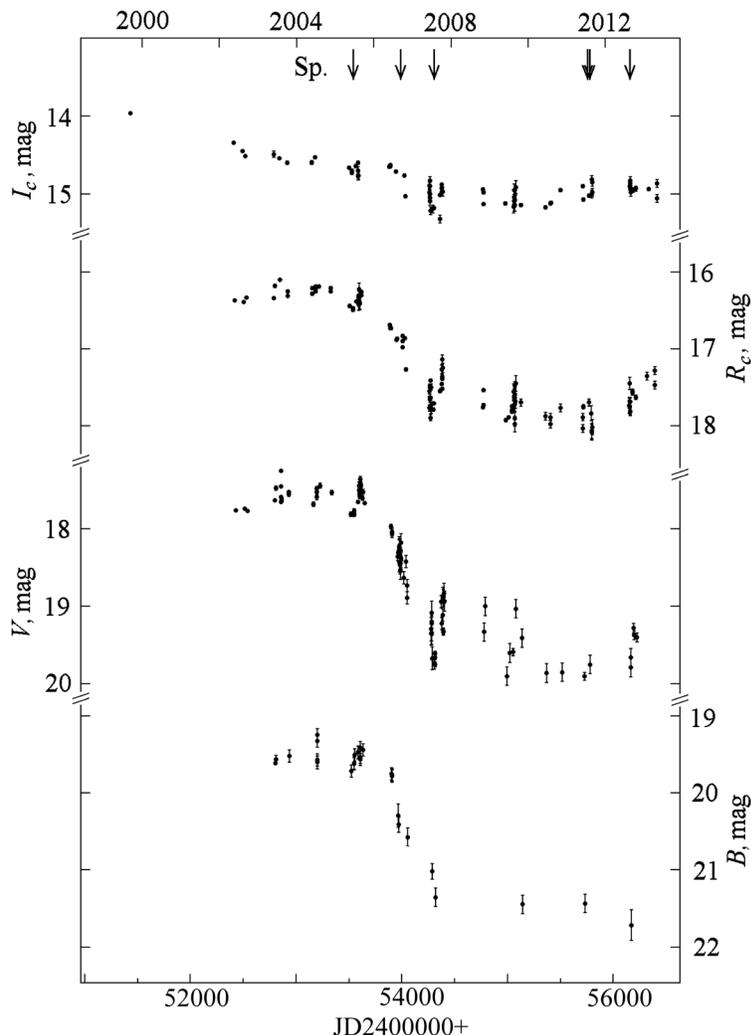


Рис. 1. Кривые блеска V4332 Sgr в системе $BV(RI)C$. Стрелками вверх указаны моменты получения спектров на телескопе БТА.

на 0^m4-0^m5 намечается также и в фильтрах V и R_C . На спаде блеска и в низком состоянии наблюдаются колебания блеска с амплитудой до 0^m8 с характерным временем $200-300$ дней. Амплитуда этих относительно быстрых изменений увеличивается с уменьшением яркости звезды. Впрочем, небольшой подъем блеска в $2011-2013$ гг. можно объяснить тем, что новые наблюдения случайно попали на моменты, близкие к максимумам циклов этих быстрых колебаний. Однако эта тенденция увеличения блеска может оказаться важной для понимания природы остатка, и потому требуется продолжение мониторинга V4332 Sgr.

На Рис. 2 показаны изменения показателей цвета V4332 Sgr. В показателях цвета $V - R_C$ и $R_C - I_C$ с 2003 г. наблюдается общая тенденция покраснения звезды с ослаблением блеска, в то время как $B - V$ остается постоянным в пределах точности измерений, или даже становится слегка

более голубым. Мы объясняем такое поведение показателей цвета тем, что при постепенном ослаблении блеска и покраснении континуума M-звезды в синей и желтой областях спектра, возможно, увеличивается доля излучения еще одной слабой и более горячей звезды. Та же тенденция наблюдается и на диаграммах цвет-величина на Рис. 3. При ослаблении блеска показатели цвета $V - R_C$ и $R_C - I_C$ V4332 Sgr становятся более красными, а $B - V$ — более голубым. Амплитуда изменения показателя цвета $V - R_C$ составила 0^m7-0^m8 , а $R_C - I_C$ — 1^m5 . Тенденция увеличения блеска объекта в последние три года ($2011-2013$) сопровождается уменьшением показателя цвета $R_C - I_C$.

Полученные на БТА спектры V4332 Sgr показаны на Рис. 4 (в синей области) и на Рис. 5 (в красной области). Эти спектры откалиброваны, и потоки выражены в физических единицах с помо-

щью одновременных или близких по времени фотометрических данных. Отождествления атомарных и молекулярных эмиссионных линий даны согласно [4, 20, 24] в синей области спектра и [25] в красной. Важной проблемой отождествления атомарных линий в синей части спектра 2005 г. остается наличие/отсутствие эмиссии FeI. Это было отмечено еще в [4]. Эмиссии FeI были отождествлены в [3] в спектре звезды, полученном в июне 1994 г. сразу после вспышки, когда температура источника излучения была значительно выше [3]. В то время эмиссии FeI наблюдались одновременно с запрещенными линиями ионов [Fe II] [4]. Линия 5164.3 Å, отождествленная в [21] с FeI $\lambda\lambda$ 5166.3, 5168.9, в нашем спектре более надежно отождествляется с молекулярной эмиссией TiO λ 5167.0. Соответствующая полоса TiO видна в континууме M-звезды в абсорбции. Эмиссия TiO близка по длине волны к эмиссии SrI λ 5166.2, и эта линия может вносить значительный вклад в бленду. Эмиссия FeI λ 4376 [20] полностью совпадает по длине волны и лучевой скорости с молекулярной эмиссией AlO(6,3). Другого отождествления для FeI λ 5110 [20] (которая является блендой с AlO(1,2) и надежно разрешается) не найдено. Возможно, появление этой линии FeI связано с флуоресценцией.

Главной особенностью спектров в диапазоне 3900–5600 Å является ослабление интенсивности эмиссионных линий и звездного континуума в период между 2003 и 2011 гг. То же ослабление заметно и в фотометрических данных. Резонансные линии AlI λ 3961, MnI λ 4030, CaI λ 4227, триплет SrI $\lambda\lambda$ 4254.3, 4274.8, 4289.7, молекулярные линии AlO и TiO еще видны в 2007 г., а на более поздних спектрах они тонут в шумах. В спектре 2007 г. и в более поздних спектрах не видна интеркомбинационная линия MgI λ 4571, исчезла более сильная в 2005 г. резонансная линия SrI λ 4607.

Спектр M-звезды с ее полосами поглощения TiO уже не виден в этом диапазоне, хотя слабый континуум заметен. Возможно, что это спектр еще одной звезды, более слабой и горячей, вклад которой наблюдается также и в фотометрии. По мере ослабления M-звезды доля этой слабой звезды в суммарном блеске увеличивается, особенно в коротковолновом диапазоне оптического спектра. По спектру и фотометрии вклад слабой звезды можно грубо оценить как $V \sim 20^m$, $B - V \sim 1^{m.4}$ [34]. Этот слабый компонент может быть как звездным остатком взрыва 1994 г., так и звездой дальнего или ближнего фона, случайно накладывающейся на изображение V4332 Sgr. Действительно, объект виден на плотном фоне слабых звезд. Для более надежного доказательства существования этого слабого звездного компонента, принадлежности его

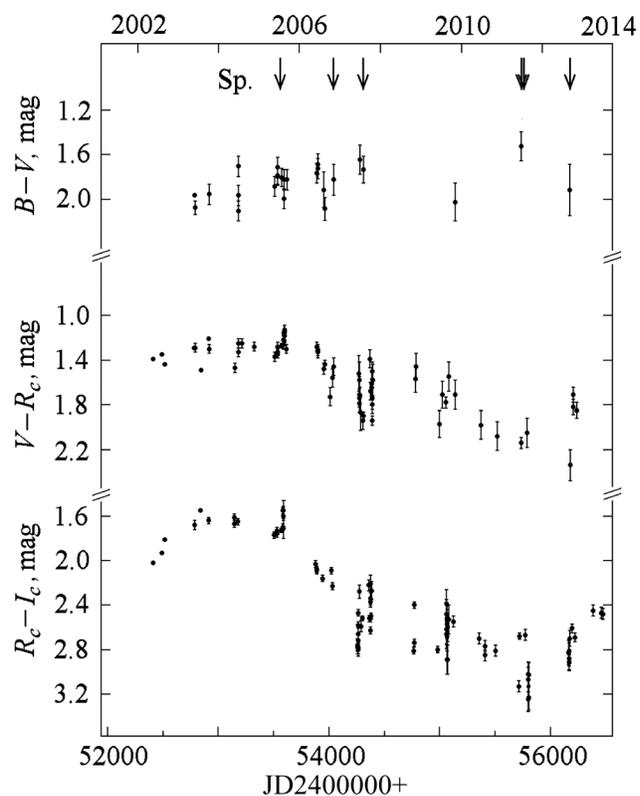


Рис. 2. Изменения показателей цвета V4332 Sgr. Стрелками указаны моменты получения спектров на телескопе БТА.

к системе V4332 Sgr и установления его природы требуются наблюдения с высоким угловым разрешением на большом телескопе.

В диапазоне 5700–7500 Å (Рис. 6) также видно значительное уменьшение интенсивностей эмиссии атомов и молекул со временем в период между 2006 и 2012 гг. В нижнем спектре яркость эмиссии NaI D₂D₁ снова заметно увеличилась, что отражает слабую тенденцию увеличения блеска в период 2011–2013 гг., наблюдаемую в фотометрии. В то же время изменения континуума M-звезды в районе 6700–7400 Å значительно меньше тех, которые произошли в синем диапазоне. При наличии фотометрических данных потоки излучения в эмиссиях и в континууме можно разделить, что и было сделано в нашей работе [34]. На Рис. 6 показано изменение потоков в атомарных линиях SrI, бленды NaI D₁D₂, CaI и в молекулярных линиях TiO и ScO. Кроме данных БТА использованы измерения потоков из работ [20] (дата 2003.5) и [25] (дата 2009.5). Очевидно, начиная с 2003 г., происходит постепенное экспоненциальное ослабление потоков со временем (представлено линейной функцией в логарифмической шкале). На Рис. 6 на фоне этого ослабления видны некоторые отклонения в

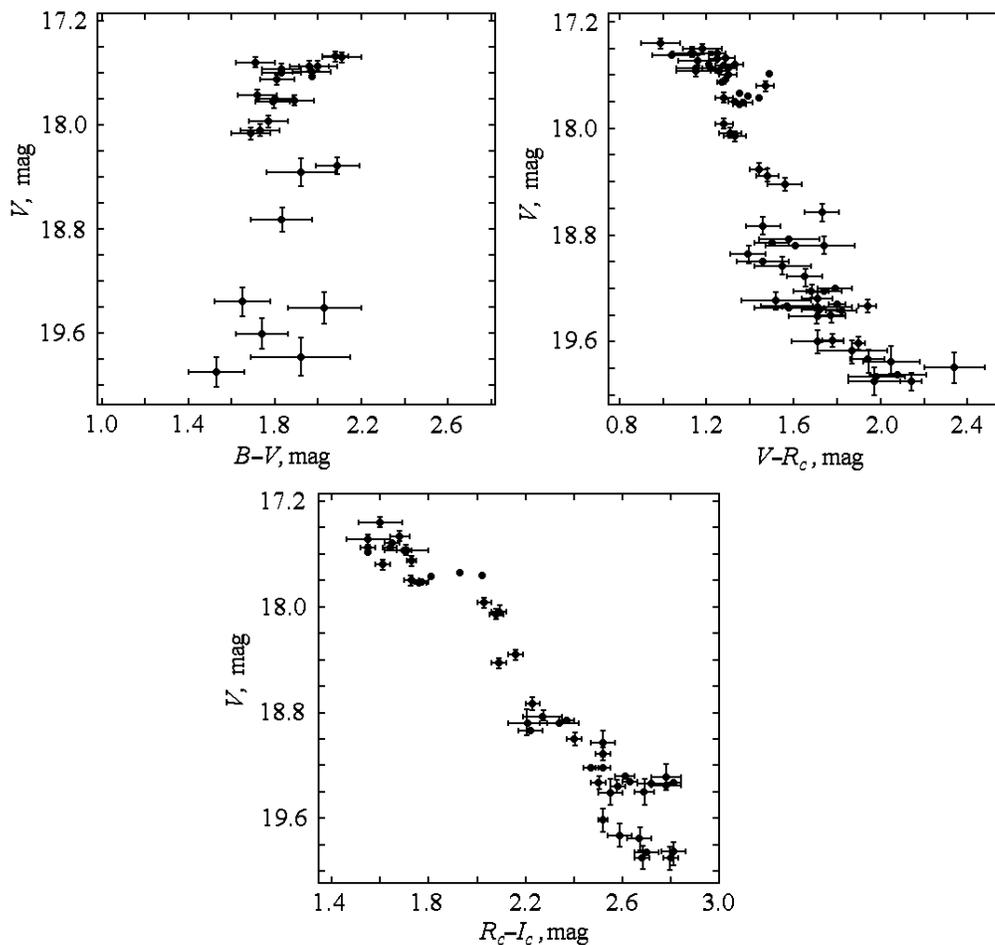


Рис. 3. Диаграммы цвет—величина для V4332 Sgr.

потоках отдельных линий от экспоненциального закона, которые, однако, не превосходят ошибки наблюдений и калибровок более чем в три раза. В отличие от фотометрических данных и плотностей потоков в континууме в разных фотометрических полосах потоки в эмиссионных линиях не обнаруживают скачкообразного падения блеска между 2006 и 2008 гг. К тому же амплитуды падения потоков в линиях значительно больше, чем в континууме. Из этого следует, что падение блеска в период 2006–2008 гг. относится к M-звезде, а атомарные и молекулярные эмиссии меняются независимо. Общий тренд ослабления потоков атомарных и молекулярных эмиссий (серая прямая линия на Рис. 6) соответствует ослаблению потоков примерно в 30 раз между 2003 и 2012 гг.

При исследовании скачка уровня континуума M-звезды мы вычли из фотометрических данных в полосах $UBVR_C I_C$ вклад атомарной и молекулярной эмиссии. Вычисления распределения энергии в континуальном спектре M-звезды до и после скачка проводились для двух эпох: для 2003–2005 гг. и

для 2011 г. Результаты показаны на Рис. 7 черными кружками (2003–2005 гг.) и прямоугольниками (2011 г.). Значки каждого спектрального распределения соединены ломанной линией. Оптические данные мы дополнили наблюдениями в ИК диапазоне из [26, 35], которые относятся соответственно к 2003 и 2011 гг. В ИК диапазоне также есть эмиссионные линии, в основном молекулярные АЮ, вклад которых не был учтен. Согласно ИК спектрам (Рис. 1 из работы [26]), относительный вклад эмиссии значительно меньше, чем в полосах оптического спектра. Распределения энергии построены с учетом межзвездного покраснения с индексом $E(B - V) = 0^m32$. Оба распределения энергии были аппроксимированы функцией Планка. Распределение энергии 2003–2005 гг. в большом диапазоне длин волн соответствует температуре абсолютно черного тела 2800 К, а распределение 2011 г. — 1780 К. Чернотельные аппроксимации свидетельствуют об изменении поверхностной температуры M-звезды приблизительно на 1000 К. Избытки излучения в коротковолновом и длинноволновом участках континуума наблюдаются и в

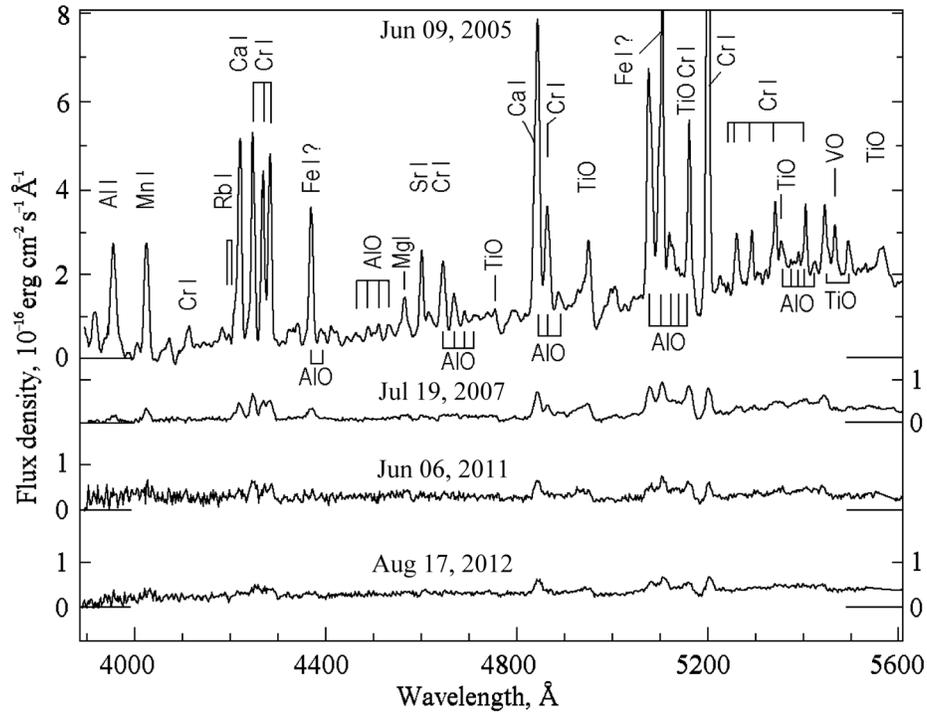


Рис. 4. Спектры БТА/SCORPIO, прокалиброванные с помощью фотометрии, синяя область. По оси абсцисс отложена длина волны, по оси ординат — плотность потока в эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{Å}^{-1}$.

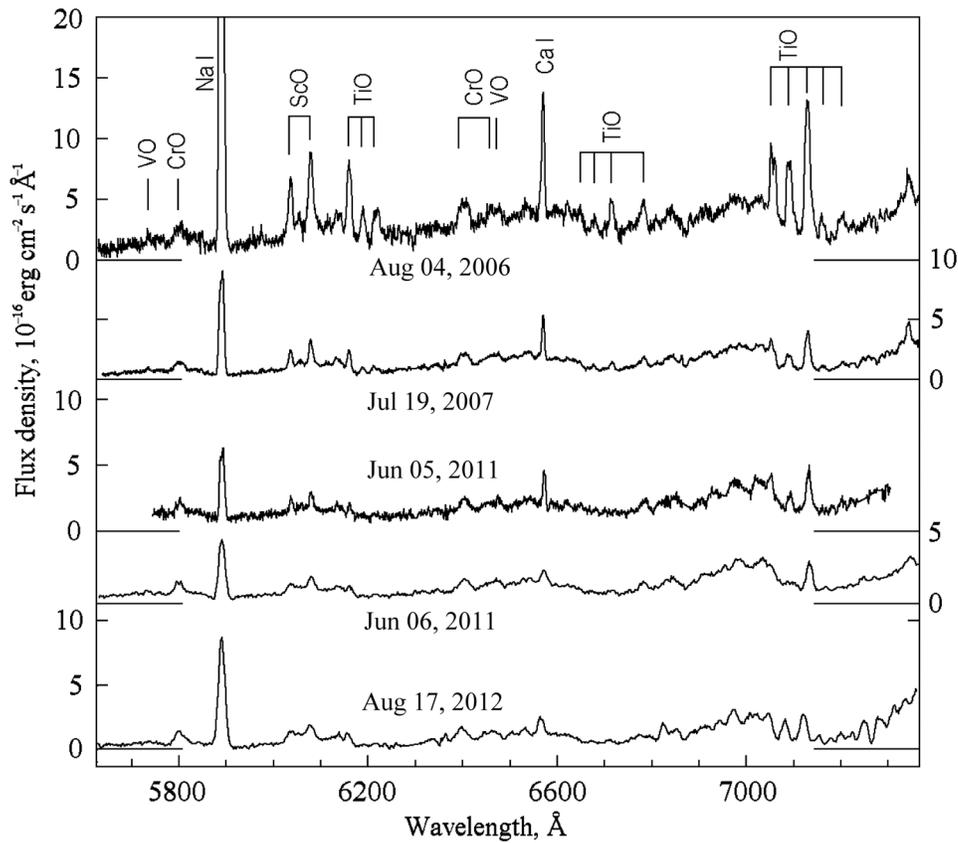


Рис. 5. Спектры БТА/SCORPIO, прокалиброванные с помощью фотометрии, красная область.

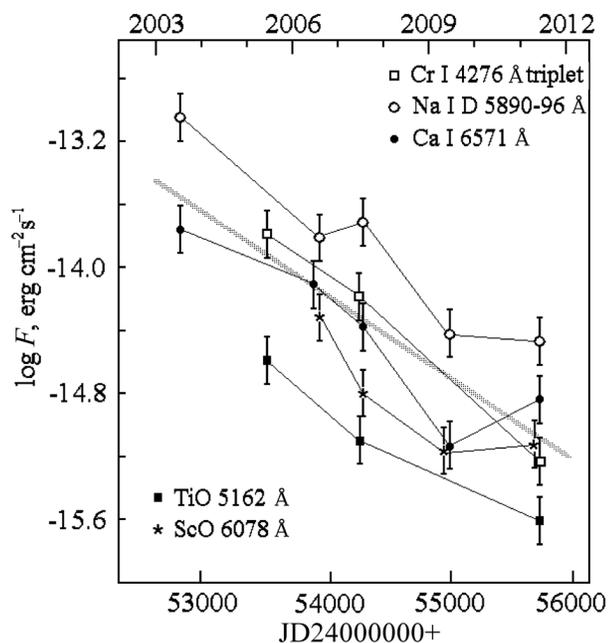


Рис. 6. Изменения потоков в атомарных и молекулярных эмиссиях со временем. По оси ординат отложен десятичный логарифм потока в единицах $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

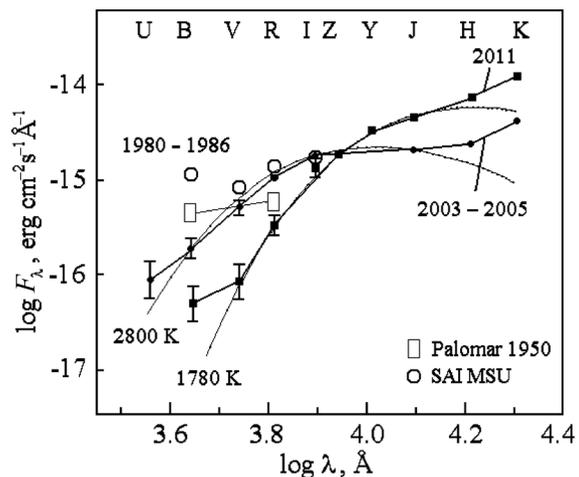


Рис. 7. Распределения энергии в континууме V4332 Sgr в разные моменты времени. Заполненные кружки — по наблюдениям 2003–2005 гг. до скачкообразного изменения блеска. Заполненные квадраты — по наблюдениям 2011 г. В этих наблюдениях вычитался вклад эмиссионной составляющей в фильтрах $UBVRcIc$ и показаны ошибки наблюдений. Распределение энергии аппроксимировано функцией Планка. Наблюдения до вспышки нанесены на график незаполненными значками. Прямоугольники — наблюдения 1950 г. по Паломарскому обзору неба, кружки — наблюдения в фильтрах BV 1980–1986 гг. (Крымская станция ГАИШ МГУ) и в фильтрах R и I 1985–1987 гг. (DSS).

первую, и во вторую эпохи. Избыток в полосах H и K связан с пылевой составляющей, а в полосах U и B — со слабой звездой, которая обнаруживается по фотометрическим и спектральным данным.

На этот же график (Рис.7) мы нанесли архивные наблюдения V4332 Sgr, полученные до вспышки. Светлые прямоугольники — наблюдения в полосах B и R по Паломарскому обзору неба (POSS-I), полученные в 1950 г. Кружки — фотографические наблюдения в системе B и V , полученные на 50-см менисковом телескопе АЗТ-5 Крымской станции ГАИШ МГУ, и снимки в системе R , полученные на телескопе Шмидта ESO в 1985 г., и в системе I на Паломарском телескопе Шмидта в 1987 г. (POSS-II). Все наблюдения были обработаны с одним и тем же фотометрическим стандартом [22] и опубликованы в [24]. О спектральном составе излучения звезды до вспышки нет никакой информации. В 1980–1986 гг. в спектре было видно излучение той же M -звезды, континуум которой виден в 2003–2005 гг., и кроме нее в спектре был виден голубой компонент, который уже отсутствует после вспышки [22, 24]. Конечно, первый вывод зависит от предположения, что до вспышки спектр состоял только из звездных компонентов. Паломарские наблюдения 1950 г. расположены заметно ниже и свидетельствуют о постепенном увеличении блеска M -звезды или ее быстрой переменности. Но эти наблюдения также свидетельствуют об избытке излучения в синей области спектра по сравнению с распределениями энергии, которые наблюдались после вспышки 1994 г. Вывод о присутствии голубого компонента в 1980–1986 гг. не зависит от переменности M -звезды. Он основан на двух парах пластинок в B и V -лучах, причем каждая пара получена в соседние ночи. За сутки M -звезда не могла столь значительно изменить свой блеск, чтобы это могло повлиять на показатель цвета $B - V$. Потоки в этих полосах получены усреднением наблюдений в эти ночи.

Архивные наблюдения V4332 Sgr также свидетельствуют об увеличении блеска голубого компонента между 1950 и 1980–1986 гг. (Рис. 7).

Мы решили по своим данным проверить утверждение в работе [25] о том, что центральный объект теперь погружен в пылевой диск, и что “фотосферный спектр этого объекта, наблюдаемый в оптике, формируется рассеянием излучения звезды на частицах пыли [околозвездного] диска.” К тому же в более поздней работе [27] было обнаружено, что излучение в континууме сильно поляризовано, что бывает при больших углах рассеяния. Вопрос состоял в том, чем обусловлено внезапное изменение распределения в континууме звезды в 2006–2008 гг., если не падением ее поверхностной температуры? Увеличением покраснения света из-за перекрытия пылевым диском и/или рассеянным

светом при полном покрытии звезды диском? При рассеянии света мелкими частицами (рэлеевское рассеяние) рассеянный свет становится более голубым. Это противоречит нашим наблюдениям, которые показывают сильное поокраснение спектра. При рассеянии крупными частицами распределение энергии в спектре отраженного света не изменится, но свет будет поляризован. Так что эти две гипотезы и промежуточные состояния с набором разнородных рассеивающих частиц не подходят. Поглощение света звезды крупными частицами диска выглядит как затмение непрозрачным экраном и изменения формы континуума вызвать не может. Поглощение мелкими частицами так же, как межзвездное поглощение, вызывает поокраснение звезды. С использованием закона межзвездного поглощения из работы [36] мы попытались подобрать такое значение избытка цвета $E(B - V)$ для распределения энергии 2011 г., при котором наклон этого распределения сравнялся бы с наклоном распределения энергии 2003–2005 гг. (в той части спектра, где распределения не искажены синим и красным избытками излучения). Оказалось, что такое значение избытка цвета существует, однако это требует предположения о том, что собственная светимость M -звезды при спаде блеска 2006–2008 гг. одновременно увеличилась. Конечно, такое событие при экранировании звезды краем диска маловероятно. К тому же значительное падение блеска 2006–2008 гг. в рамках модели “Гамбургера Гомеса” может быть объяснено только утолщением самого пылевого диска, так как предполагается, что M -звезда является центральным объектом. В конечном счете мы приняли гипотезу уменьшения поверхностной температуры звезды, которое при этом связано с уменьшением ее светимости, то есть гипотезу переменности M -звезды.

Результаты наблюдений поляризации [27], выполненных в августе 2010 г. в фотометрических полосах V и R (40% в V и 20% в R), выглядят особенно интересными при сравнении с нашими спектральными данными. По данным [27], вклад эмиссии в обеих полосах составлял около 40% (по нашим данным, наиболее близким по времени и относящимся к июню 2011 г., вклад эмиссии оценивается как 4–6% в V и 13–15% в R_C). При этом спектр M -звезды уже сместился в красную сторону из полосы V и в этой полосе очень слаб, хотя его можно заметить по полосам TiO (Рис. 5). Доминирует спектр еще одной, слабой и более горячей звезды. Остается неясным, к какому объекту относится столь высокая поляризация в полосе V . По нашему мнению, результаты поляриметрии следует проверить.

3. ПРИРОДА V4332 Sgr

V4332 Sgr с учетом высокой галактической широты $|b| = 9.4^\circ$ можно отнести к объектам галактического балджа или толстого диска, и это указывает на большой возраст системы. Малое межзвездное поокраснение $E(B - V) = 0.32$ совсем не является свидетельством ее близости. Прозрачность в этой области в Стрельце довольно хорошая. Близко, и даже на меньшей галактической широте -4.8° , расположена хорошо изученная система с черной дырой V4641 Sgr, расстояние до которой оценивается в 7.4–12.3 кпк; она имеет такое же межзвездное поокраснение [37]. В отличие от красной новой V838 Mon, предшественником которой была система молодых и массивных B -звезд, V4332 Sgr — старый проэволюционировавший объект. Предположение о большом возрасте подтверждает присутствие M -гиганта в системе до и после вспышки 1994 г. Это значит, что по крайней мере одна звезда этой системы уже прошла стадию главной последовательности. Лучевая скорость для M -звезды $V_r = -56 \pm 16$ км с $^{-1}$, а для газовой составляющей лучевая скорость, определенная по эмиссионным линиям атомов металлов, находится в пределах от -58 до -75 км с $^{-1}$. Это не означает, что V4332 Sgr принадлежит к экстремальному населению II типа, бедному металлами. Континуальный спектр V4332 Sgr указывает на принадлежность M -звезды к кислородной ветви холодных звезд. А при сравнении спектров V4332 Sgr и V838 Mon в синей области в [28] обнаружены те же резонансные линии металлов AlI, MnI, CaI и CrI с той лишь разницей, что у V4332 Sgr они в эмиссии, а у V838 Mon — в абсорбции. То есть различие остатков взрывов состоит только в том, что у первого объекта излучение происходит в оптически тонкой среде, а у второго — поглощение в оптически толстой фотосфере.

Остается открытым вопрос о природе голубой горячей звезды, наблюдавшейся в системе V4332 Sgr до 1994 г. В принципе распределение энергии предшественника V4332 Sgr похоже на распределение энергии у симбиотических звезд. Однако утверждать наличие симбиотической звезды нельзя, так как нет данных о линейчатом спектре до вспышки, а это для такой классификации обязательно. Горячие звезды встречаются среди объектов старого населения. Это звезды горизонтальной ветви шаровых скоплений — звезды с двойным энергетическим источником (центральным гелиевым и слоевым водородным), прошедшие стадию красного гиганта. Горячие звезды горизонтальной ветви встречаются, однако, в шаровых скоплениях с низким содержанием металлов. Вероятность такого объекта в системе V4332 Sgr мала, потому что

в ее спектре большой набор линий металлов и их оксидов.

В шаровых и старых рассеянных скоплениях встречаются “голубые страгглеры” (stragglers: отставшие, беглецы *рус.*) — звезды, расположенные на главной последовательности значительно выше точки поворота эволюции в красные гиганты диаграммы цвет—величина звезд скопления. Очевидно, это более массивные звезды, отставшие в своем развитии от основного звездного населения. В работе [38] ее авторы развивали идею, что страгглеры возникли при столкновениях или при слиянии звезд, прошли стадию перемешивания и начали эволюцию заново с главной последовательности. В [39] при изучении голубых страгглеров в шаровом скоплении NGC 5466 были обнаружены три переменные звезды, две из которых были отождествлены как контактные системы типа W UMa. Двойные системы обнаружены среди страгглеров и в других работах, цитированных в [39]. В этой работе предполагалось, что непременные голубые страгглеры являются остатками контактных систем — одиночными быстро вращающимися звездами. В 2008 г. в случае красной новой V1309 Sco получены прямые наблюдения слияния контактной системы [10, 11]. До вспышки кривая блеска этой системы была двойной волной с периодом $1^d.4$, которая затем превратилась в одиночную волну с близким уменьшающимся периодом (формирование общей оболочки). Интересно проследить, получится ли в результате слияния голубой страгглер? В старых рассеянных скоплениях M 67 и NGC 188 также встречаются страгглеры, а в M 67 они образуют квазигоризонтальную ветвь. Один из таких объектов — ES Sps (S 1082) — является иерархической кратной системой, содержащей даже два страгглера. Один входит в тесную двойную систему с орбитальным периодом $1^d.07$ вместе со звездой главной последовательности вблизи точки поворота, а другой находится на эллиптической орбите вокруг двойной системы [40].

Если предположить, что в системе V4332 Sgr до взрыва присутствовал страгглер, имеющий светимость страгглеров квазигоризонтальной ветви M 67, то расстояние до V4332 Sgr оценивается в 10–16 кпс.

Принимая гипотезу о страгглере в системе V4332 Sgr, мы имеем три возможных объяснения события 1994 г.

(1) Сближение и столкновение одиночной звезды-страгглера с красным гигантом, которое привело ко взрыву, расширению и сбросу оболочки гиганта и перестройке его структуры. Возможно, столкновение произошло вследствие эволюции орбиты под влиянием третьего компонента.

(2) Центральный взрыв неизвестной природы самого страгглера в двойной системе с красным гигантом. Возможно, эта система была полурасделенной с аккреционным диском или симбиотической. Но известно, что взрывы водорода, накопившегося на поверхности белых карликов или субкарликов (симбиотические новые), не приводят к феномену красных новых.

(3) Страгглер был контактной системой, которая была частью иерархической тройной системы с красным гигантом. Взрыв произошел при слиянии компонентов в контактной системе. В этом случае мы будем иметь феномен красной новой, подобный V1309 Sco, в присутствии еще и красного гиганта. Если случилось именно так, то в некотором промежутке времени после максимума вспышки в системе окажется два красных гиганта: один — это остаток взрыва красной новой, второй — компонент системы, который наблюдался до вспышки. Так что третья гипотеза может быть проверена.

Изменения физических параметров V4332 Sgr во вспышке 1994 г. и при падении блеска после вспышки исследованы в работе [21] по фотометрическим и спектральным наблюдениям [3] и [41]. Наблюдения в [21] сравнивались с более поздней фотометрией в ИК и в оптическом диапазонах 1999 и 2003 гг. и со спектрами 2003 г. Результаты анализа — спектральные классы, эффективные температуры, радиусы и светимости этой системы — приведены в Таблице 3 работы [21]. Определенная нами чернотельная температура для континуума M-звезды по наблюдениям 2005 г. получилась примерно на 500–700 К ниже, чем температура звезды в мае–сентябре 2003 г. из работы [21]. Возможно, здесь есть систематическая ошибка, связанная с учетом вклада эмиссионного спектра в фотометрические полосы. К тому же авторы [21] приняли явно заниженное расстояние до V4332 Sgr примерно в 1.8 кпк, ошибочно предположив, что предшественником взрыва является “звезда типа Солнца” главной последовательности. Однако количественные данные [21] можно рассматривать в сравнении. В Таблице 3 работы [21] видно, что спектр M2–M4 III–I наблюдался на спаде блеска с 8 по 11 марта 1994 г. на уровне светимости $154\text{--}66 L_{\odot}$, после чего в июне 1994 г. у звезды спектр стал более поздним — M8–M9 III–I на уровне светимости $86\text{--}11 L_{\odot}$. Но в мае–сентябре 2003 г. звезда оказалась с тем же более ранним спектром M2–M4 III–I на низком уровне светимости $5.9\text{--}4.8 L_{\odot}$. Эти наблюдения можно трактовать так, что на спаде блеска 8–11 марта 1994 г. доминировало излучение звезды M2–M4 — остатка взрыва, после чего температура и светимость остатка упали. Но в мае–сентябре

2003 г. в континууме остался только свет звезды M2–M4 — того компонента системы, который был отождествлен нами еще до взрыва, в 1980–1986 гг. Конечно, на спаде блеска наблюдатели не могли выделить более слабую звезду такого же спектрального класса. В 2003 г. остаток взрыва обнаружился по эмиссионному спектру и ИК избытку, а компонент класса M2–M4 стал видимым. Так что третья гипотеза является наиболее вероятной.

Последующая эволюция остатка взрыва V4332 Sgr прослежена с 2003 по 2013 гг. Наши наблюдения показали экспоненциальное ослабление потоков в атомарных и молекулярных эмиссионных линиях за десять лет примерно в 30 раз. В 2003 г. ИК наблюдения зафиксировали формирование пыли в виде мощных избытков излучения [23]. Значительные изменения блеска и температуры M-звезды в 2006–2008 гг. не показывают очевидной связи ни с формированием пыли, ни с постепенным ослаблением потоков в эмиссиях. Модель “Гамбургера Гомеса” для V4332 Sgr, обсуждавшаяся в [25], в которой предполагается, что центральная звезда M-гигант полностью скрыта в толще пылевого диска, выглядит неоправданно сложной. Она не объясняет радикальных изменений потоков излучения в линиях в 30 раз и изменения континуального спектра M-звезды. Эти изменения не могут быть объяснены ни околовзвездным покраснением, ни отражением пылью, ни рэлеевским рассеянием. Изменения континуального спектра в 2–4 раза в зависимости от длины волны имели скачкообразный характер и объяснялись собственной переменностью M-звезды. Поэтому в [34] мы предположили, что существует отдельный от M-звезды остаток взрыва, который излучает в эмиссиях и в ИК диапазоне. В этом остатке сформировалась пыль, и он просто остывает после взрыва. Масса этого источника может составлять несколько масс Солнца, и потому он остывает в течение длительного времени.

Проблема формирования необычного холодного спектра дискутировалась в [25], где молекулярный и атомарный спектры V4332 Sgr объясняются радиативным возбуждением. Источником возбуждающего излучения может быть континуум звезды спектрального класса M5–M6 III с температурой $T = 3200$ К (для 2003 г.). В работе [25] приводился аргумент против предположения об охлаждении массивного облака, как причины излучения молекул в эмиссии. Это низкая температура среды (около 120 К), при которой невозможно возбуждение оптических линий столкновениями. Эти аргументы должны быть приняты в расчет. Однако нельзя согласиться с тем, что M-звезда является остатком взрыва (она наблюдалась и до вспышки). Она не является центральным объектом системы и источником биполярного истечения вещества в

результате взрыва 1994 г., в котором формируется необычный спектр. Остается под сомнением и гипотеза о том, что ИК источником является пылевой диск, окружающий M-звезду.

Если сравнить эволюцию остатка V4332 Sgr с эволюцией остатка хорошо изученной красной новой V838 Mon, можно обнаружить существенные различия. Предшественник V838 Mon являлся двойной системой молодых и массивных B-звезд. Остаток V838 Mon является холодной звездой класса M, и в спектре звезды доминирует ее континуум. Компонент системы — звезда класса B3 V — в 2006 г. сблизился с этим остатком и погрузился в него, пройдя сквозь его оболочку. Ниже внешнего слоя оказалась пустота, в которой он двигался более двухсот дней, прежде чем исчезнуть полностью. При движении под внешним слоем его излучение было ослаблено примерно в пять раз и было сильно переменным. Такая структура оболочки была предсказана по ИК наблюдениям в [42]. Спектр с холодным континуумом остается и теперь (май 2013 г.). То есть остаток выглядит как звезда уже в течение 11 лет. Возможно, скоро он будет динамически разрушен в результате сближения со спутником класса B3 V, и при этом даже звездное ядро может быть выброшено из него, если оно существует.

В системе V4332 Sgr, в отличие от V838 Mon, следы динамического разрушения остатка взрыва стали заметны сразу после вспышки. В ранних спектрах, полученных в [3], видны разрешенные и запрещенные эмиссии Fe II, то есть в системе присутствовали горячий источник ионизирующего излучения и разреженный газ. Это, возможно, результат проявления внутренних горячих слоев при разрушении остатка или результат формирования ударной волны при взаимодействии с M-звездой. Видна сильная интеркомбинационная линия Mg I $\lambda 4571$. Требуется большая масса газа в разреженном состоянии, чтобы сформировать столь сильную линию. Газ мог быть выброшен из остатка при его разрушении. Возможно, в этой разреженной части остатка взрыва эмиссионный спектр формируется путем радиативного возбуждения M-звездой. О взаимодействии остатка и M-звезды свидетельствует переменность M-звезды. Повышенная светимость и температура ее поверхности непосредственно перед вспышкой могут быть связаны с аккрецией на нее из двойной системы в стадии слияния и формирования общей оболочки, а после вспышки — из расширяющейся оболочки.

4. О ПРИРОДЕ ХОЛОДНЫХ ВЗРЫВОВ

Мы считаем, что природа “холодных” взрывов красных новых связана с кратковременным эпи-

зодом выделения энергии в центре звезд, обладающих массивными оболочками. При центральных взрывах оболочка получает медленный толчок изнутри и расширяется. Тепловая энергия взрыва доходит до поверхности звезды на несколько лет позже, когда ее поверхность имеет столь большую площадь, что эта энергия не может нагреть ее до высокой температуры. Эта идея впервые в отношении красных новых была изложена в [3] без достаточного обоснования. Авторы предполагали, что произошел взрыв в центре проэволюционировавшей звезды, то есть на поздней стадии эволюции. Природу таких взрывов можно объяснить у объектов на пост-асимптотической стадии эволюции (подобных, например, FG Sge или V4334 Sgr, известному также под именем “Объект Сакураи”). Это углеродные звезды, которые отличаются по спектрам и химическому составу от M-звезды (кислородная звезда) и газовой составляющей V4332 Sgr, а также по длительности вспышек. Однако в случае V838 Mon мы имеем молодой объект, расположенный на начальной главной последовательности. Возможность термоядерного взрыва водородного ядра молодой звезды в конце стадии гравитационного сжатия отвергается современными теоретиками, занимающимися модельными расчетами. Они считают, что процесс включения термоядерного горения не приводит к взрыву, он длительный и “очень мягкий.” Тем не менее, взрывы в ядрах протозвезд в конце стадии гравитационного сжатия, когда водородное ядро полностью ионизовано, были предсказаны основоположниками эволюционной теории протозвезд [43]. Известны также мощные вспышки маломассивных молодых звезд типа T Tau (FU Ori, V1504 Cyg и других объектов класса “фуоров”), которые, однако, чаще интерпретируются не как включение водородного горения в центре звезд, а как эпизодические события аккреции из массивных околозвездных дисков [44].

Что же происходит в случае высвобождения дополнительной энергии в ядре звезды при взрыве или по другой причине? Звезда теряет механическое и тепловое равновесие, при этом ее оболочка приходит в движение, и равновесие постепенно восстанавливается.

Поскольку информация об изменении давления в газе переносится звуковыми волнами, звезда восстанавливает утраченное механическое равновесие за время, которое требуется звуковым волнам, чтобы пройти диаметр звезды. Это время довольно мало: например, для Солнца — около часа... Характерные времена тепловых процессов, протекающих в звезде (например, время переноса энергии из ядра к поверхности...), значительно

больше — сотни тысяч, миллионы и даже миллиарды лет [45].

Скорость лучевого переноса определяется длиной свободного пробега фотона в недрах звезды $S \approx (\kappa \rho)^{-1}$, где κ — коэффициент непрозрачности вещества, а ρ — плотность вещества. Для ядра Солнца эта длина составляет 0.1 мм, а для массивных звезд она еще меньше. Так что случай взрыва в центре приведет к выходу на поверхность звезды ударной волны, которая будет выглядеть как кратковременная вспышка, а затем к расширению оболочки, в которой энергия взрыва будет сконцентрирована на ее дне. Конвекция в этом случае не будет действовать. При этом плотность энергии оболочки во всех ее слоях будет уменьшаться, а длина свободного пробега фотонов — увеличиваться, так что энергия взрыва достигнет поверхности звезды не за сотни тысяч или миллионы лет, а быстрее, за несколько лет. Такой режим расширения оболочки может быть описан как близкий к адиабатическому. Так как тепловая энергия взрыва заключена в оболочке, энергетический выход уменьшается, а площадь поверхности увеличивается. При адиабатическом режиме расширения сначала происходит быстрое расширение оболочки, а затем энергия взрыва выносится на поверхность. При адиабатическом расширении мы увидим спад блеска звезды, продолжающийся от момента взрыва до момента, пока энергия взрыва не достигнет поверхности. При “мягком воспламенении водорода” в центре мы не увидим даже ударной волны. Очень важно проверить эту гипотезу динамическими расчетами, которые еще не проводились.

Наблюдения OGLE красной новой V1309 Sco демонстрируют спад блеска перед вспышкой из-за адиабатического расширения общей оболочки контактной системы на 1^m0 в полосе I продолжительностью около года (Рис. 1 в [11]). В этом случае надежно установлено, что причиной энерговыделения в центре звезды было слияние ядер звезд контактной системы. Ослабление блеска другой красной новой, V838 Mon, в полосе R на 0^m461 было обнаружено в 1998 г. [46], за четыре года до вспышки. После вычитания вклада вторичного компонента спад блеска взорвавшейся звезды тоже составляет 1^m0 . В случае V838 Mon удалось надежно установить, что вспышке красной новой предшествовало расширение оболочки. Так как расстояние до V838 Mon надежно измерено, известен фотометрический вклад взорвавшегося компонента в фильтрах BVR до вспышки, спектры в первые дни появления новой и болометрические поправки, то могут быть определены светимость и температура. Радиус звезды определяется по закону Стефана-Больцмана из формулы: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$. 10 февраля 1994 г. предшественник взрыва — звезда класса

V3 V — имел радиус $2.9 R_{\odot}$, а 12 января 2002 г. это был сверхгигант K0 I с радиусом $327 R_{\odot}$. Около 12 января блеск звезды достиг первого максимума после первоначального подъема блеска. В пике вспышки на гребне ударной волны 5 февраля 2002 г. радиус сверхгиганта был уже $425 R_{\odot}$ со спектром A7 I, а 14 октября 2012 г. — $442 R_{\odot}$ со спектром M6 I. Так что в январе 2002 г. радиус звезды оказался в 112 раз больше, а площадь поверхности — в 12.5 тысяч раз больше, чем у предшественника взрыва. Это надежные свидетельства того факта, что перед появлением красных новых у звезд происходит близкое к адиабатическому режиму расширение оболочки, в то время как момент центрального взрыва произошел на несколько лет раньше. К сожалению, момент расширения оболочки V4332 Sgr был пропущен и не представлен наблюдениями.

Открытие красной новой V1309 Sco и уникальные наблюдения OGLE слияния компонентов контактной системы в этом случае показывают, что феномен красной новой случается в двойных или кратных системах. Наоборот, для V838 Mop нет никаких свидетельств двойственности взорвавшейся звезды. Сближение остатка взрыва с горячим компонентом системы и поглощение компонента остатком произошло через три года после взрыва. Так что это взаимодействие звезд в системе V838 Mop не явилось причиной феномена красной новой.

5. ВЫВОДЫ

Показаны результаты многоцветных фотометрических наблюдений в системе BVRI и спектроскопии на БТА/SCORPIO красной новой V4332 Sgr, выполненные в 2005–2013 гг. Поведение остатка новой исследовано по нашим данным в совокупности со всеми опубликованными наблюдениями и архивной фотографической фотометрией. Атомарный и молекулярный эмиссионные спектры ослабевали по экспоненциальному закону, причем с 2003 г. потоки в линиях уменьшились в среднем в 30 раз. Континуум M-гиганта в спектре ослабел скачком в 2006–2008 гг. в 2–4 раза, наиболее заметно в синем диапазоне. Изменения распределения энергии в спектре соответствуют понижению поверхностной температуры M-гиганта на 1000 К. Спектроскопия и фотометрия обнаруживают еще одну очень слабую звезду примерно 20^m , которая может быть либо членом системы, либо звездой поля.

Установлено, что M-звезда не является ни предшественником, ни остатком красной новой в этой системе. Предшественником взрыва может быть голубой страгглер, излучение которого исчезло из

спектрального распределения энергии после взрыва 1994 г. Наиболее вероятно, что этот объект был контактной системой. Так что мы склоняемся к гипотезе о слиянии компонентов контактной двойной звезды в иерархической тройной или кратной системе для объяснения феномена красной новой у V4332 Sgr. Переменность M-гиганта до взрыва можно объяснить взаимодействием его с предшественником — тесной двойной, которая с потерей орбитального момента переходила в стадию с общей оболочкой, а часть ее вещества перетекала на поверхность M-гиганта. После взрыва расширяющаяся оболочка была динамически разрушена, и аккреция из нее на M-гигант продолжалась некоторое время.

Причиной феномена красной новой является внезапное взрывное энерговыделение в центре звезды с массивной оболочкой и последующее расширение оболочки в режиме, близком к адиабатическому. В результате тепловая энергия взрыва доходит до поверхности оболочки за год или за несколько лет. Причиной взрыва в центре звезды может быть как неустойчивость в ядре молодой массивной звезды, так и слияние ядер двух звезд в контактной системе со сформировавшейся общей массивной оболочкой. Таким образом, красные новые могут быть разнородными объектами в разных стадиях эволюции.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за поддержку этого исследования (проекты 14-02-00759, 13-02-00885, 12-02-31548, 11-02-08204-з). Эта работа была частично поддержана грантами Министерства образования и науки РФ (проекты 8406, 8416, 8630, 14.518.11.7070, 16.518.11.7073), а также грантами Президента РФ поддержки научных школ (НШ-4308.2012.2) и поддержки молодых кандидатов наук (МК-6686.2013.2, МК-1699.2014.2). Авторы выражают признательность Комитету по тематике больших телескопов и администрации САО РАН за предоставленное время на БТА и Цейсс-1000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. S. Hayashi, M. Yamamoto, and K. Hirose, IAU Circ. No. 5942 (1994).
2. R. M. Wagner, R. Bertram, P. M. Kilmartin, et al., IAU Circ. No. 5944 (1994).
3. P. Martini, R. M. Wagner, A. Tomaney, et al., *Astronom. J.* **118**, 1034 (1999).
4. E. A. Barsukova, V. P. Goranskij, P. K. Abolmasov, and S. N. Fabrika, *ASP Conf. Ser.* **363**, 206 (2007).
5. R. M. Rich, J. Mould, A. Picard, et al., *Astrophys. J.* **341**, L51 (1989).

6. A. S. Sharov, *Astronomy Letters* **19**, 83 (1993).
7. A. B. Tomaney and A. W. Shafter, *Astrophys. J. Suppl.* **81**, 683 (1992).
8. A. A. Henden, *ASP Conf. Ser.* **363**, 3 (2007).
9. U. Munari, H. Navasardyan, and S. Villanova, *ASP Conf. Ser.* **363**, 13 (2007).
10. E. Mason, M. Diaz, R. E. Williams, et al., *Astronom. and Astrophys.* **516**, A108 (2010).
11. R. Tylenda, M. Hajduk, T. Kaminski, et al., *Astronom. and Astrophys.* **528**, A114 (2011).
12. R. Tylenda, T. Kaminsky, A. Udalsky, et al., *Astronom. and Astrophys.* **555**, A16 (2013).
13. W. B. Sparks, H. E. Bond, M. Cracraft, et al., *Astronom. J.* **135**, 605 (2008).
14. M. W. Mayall, *Astronom. J.* **54**, 191 (1949).
15. S. Kimeswenger, *ASP Conf. Ser.* **363**, 197 (2007).
16. A. Pastorello, M. Della Valle, S. J. Smartt, et al., *Nature* **449**, 1 (2007).
17. S. R. Kulkarni, E. O. Ofek, A. Rau, et al., *Nature* **447**, 458 (2007).
18. U. Munari, A. Henden, R. M. L. Corradi, and T. Zwitter, *AIP Conf. Proc.* **637**, 52 (2002).
19. E. Berger, A. M. Soderberg, R. A. Chevalier, et al., *Astrophys. J.* **699**, 1850 (2009).
20. S. Kimeswenger, *Astronomische Nachrichten* **327**, 44 (2006).
21. R. Tylenda, L. A. Crause, S. K. Gorny, and M. R. Schmidt, *Astronom. and Astrophys.* **439**, 651 (2005).
22. V. P. Goranskij, N. V. Metlova, S. Yu. Shugarov, et al., *ASP Conf. Ser.* **363**, 214 (2007).
23. D. P. K. Banerjee and N. M. Ashok, *Astrophys. J.* **604**, L57 (2004).
24. V. P. Goranskii and E. A. Barsukova, *Astronomy Reports* **51**, 126 (2007).
25. T. Kaminski, M. Schmidt, and R. Tylenda, *Astronom. and Astrophys.* **522**, 75 (2010).
26. D. P. K. Banerjee, W. P. Varricatt, N. M. Ashok, and O. Launila, *Astrophys. J.* **598**, L31 (2003).
27. T. Kaminski and R. Tylenda, *Astronom. and Astrophys.* **527**, A75 (2011).
28. V. Goranskij, A. Zharova, E. Barsukova, et al., arXiv:0810.1887 (2008).
29. R. Tylenda and N. Soker, *Astronom. and Astrophys.* **451**, 223 (2006).
30. I. Iben, Jr. and A. V. Tutukov, *Astrophys. J.* **389**, 369 (1992).
31. M. M. Shara, O. Yaron, D. Prialnik, et al., *Astrophys. J.* **725**, 831 (2010).
32. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
33. H. E. Bond and M. H. Siegel, *Astronom. J.* **131**, 984 (2006).
34. E. A. Barsukova, V. P. Goranskij, and A. F. Valeev, *Central European Astrophys. Bull.* **37**, 325 (2013).
35. W. P. Varricatt, T. Wold, T. Carroll, et al., *Astron. Telegram No.* 4013 (2012).
36. B. D. Savage and J. S. Mathis, *Annual Review Astron. Astrophys.* **17**, 73 (1979).
37. J. A. Orosz, E. Kuulkers, M. van der Klis, et al., *Astrophys. J.* **555**, 489 (2001).
38. P. J. T. Leonard and A. P. Linnel, *Astronom. J.* **103**, 1928 (1992).
39. M. Mateo, H. C. Harris, J. Nemec, and E. W. Olszewski, *Astronom. J.* **100**, 469 (1990).
40. E. L. Sandquist, D. W. Latham, M. D. Shetrone, and A. A. E. Milone, *Astronom. J.* **125**, 810 (2003).
41. A. C. Gilmore, *IAU Circulars No.* 5943, 5944 and 5949 (1994).
42. D. K. Lynch, R. J. Rudy, R. W. Russell, et al., *Astrophys. J.* **607**, 460 (2004).
43. C. Hayashi and T. Nakano, *Progress Theor. Physics* **34**, 754 (1965).
44. L. Hartmann and S. J. Kenyon, *Annual Rev. Astronom. Astrophys.* **34**, 207 (1996).
45. С. А. Ламзин, в *Звезды*, Ред. Г. В. Сурдин (Физматлит, Москва, 2008), с. 119.
46. S. Kimeswenger and S. P. S. Eyres, *Inform. Bull. Var. Stars No.* 5708 (2006).

Evolution of Red Nova V4332 Sagittarii Remnant**E. A. Barsukova, V. P. Goranskij, A. F. Valeev, A. V. Zharova**

We present the multicolor *BVRI* photometry and BTA/SCORPIO spectroscopy for the red nova V4332 Sgr, performed in 2005–2012. We have analyzed the behavior of the nova remnant, considering our observations along with all the published observations and archival photographic photometry. The atomic and molecular emission spectra show an exponential weakening. Since 2003, the line fluxes have on the average decreased 30-fold. The continuum of the M-type giant in the spectrum has weakened abruptly between 2006 and 2008, twice in the red and by 4 times in the blue range. The variations in the spectral energy distribution of the stellar continuum after the outburst correspond to a decrease in the surface temperature of the M-type giant by 1000 K. The presence of a faint star of about 20^m is possible. The star can be either a member of the system or a field star. It is found that the phenomenon of the red nova in this system is not related with the M-type star. The progenitor of the explosion could be a blue straggler, which has disappeared from the spectral energy distribution after the explosion of 1994. It is most likely that this object was a contact binary system. To explain the “cold explosion” of V4332 Sgr, we have accepted the hypothesis of merging components of a contact binary star in a hierarchical triple or multiple system. There are evidences of dynamical destruction of the outburst remnant and accretion of its matter to the M-type giant. The cause of the red nova phenomenon is thought to be a sudden explosive energy release in the center of a star having a massive envelope, and a subsequent expansion of the envelope in the conditions close to adiabatic. As a result of the explosion, thermal energy reaches the surface of the envelope a year or a few years after the outburst, whereas the envelope already has a large surface area. The cause of the explosion in the center of the star can be both a merger event of the nuclei of two stars in the contact system with a formed common massive envelope and instability in the core of a single massive star. Thus, the red novae can be heterogeneous objects at different evolutionary stages.

Keywords: novae, cataclysmic variables—stars: evolution—stars: interiors—stars: individual: V4332 Sgr, V838 Mon