

УДК 524.337, 524.338

ПРЕДШЕСТВЕННИК И ОСТАТОК КРАСНОЙ НОВОЙ V838 ЕДИНОРОГА

© 2020 В. П. Горанский^{1*}, Е. А. Барсукова², А. Н. Буренков²,
А. Ф. Валеев^{2,3}, А. В. Жарова¹, П. Кроль⁴, Н. В. Метлова¹, С. Ю. Шугаров^{1,5}

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119899 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Казанский федеральный университет, Казань, 420008 Россия

⁴Обсерватория Зоннеберг, D96515 Германия

⁵Астрономический институт Академии наук Словакии, Татранска Ломница, 05960 Словакия

Поступила в редакцию 7 августа 2019 года; после доработки 12 ноября 2019 года; принята к публикации 12 ноября 2019 года

В статье представлены результаты многоцветной фотометрии и спектроскопии среднего и низкого разрешения остатка красной новой V838 Моп за 16 лет после вспышки 2002 г., а также данные архивной фотометрии предшественника по пластинкам зоннебергской и московской коллекций 1928–1994 гг. Анализ этих наблюдательных данных подтвердил, что предшественник взрыва V838 Моп был широкой парой звезд класса В3 V пониженной светимости. Взорвался компонент, который был ярче своего уцелевшего спутника на 36% и на диаграмме спектр–светимость находился на главной последовательности нулевого возраста. После окончания вспышки, осенью 2002 г., остаток был коричневым сверхгигантом класса L (sgL), но через год его спектр перешел в класс M. В распределении энергии появился избыток излучения в синем диапазоне, который мы интерпретировали как эффект отражения спутника на пыли в оболочке M-звезды. В 2008 г. спутник В3 V был поглощен расширяющимся остатком взрыва — M-сверхгигантом (sgM). При погружении спутника внутрь сверхгиганта под внешним слоем его оболочки обнаруживается пустота, в которой спутник двигался примерно в течение 200 дней. Светимость сверхгиганта в фильтре V за последние десять лет увеличилась в десять раз, а спектральный класс изменился с M7.5 до M5.5. По лучевым скоростям в линиях Ba II 6497 Å и Ca I 6572 Å обнаружено торможение его расширяющейся оболочки, причем в 2018 г. скорость оболочки сравнялась с гелиоцентрической скоростью звезды 71 км с^{-1} . В кривых блеска появились квазипериодические изменения с периодом 320 дней, особенно четко выраженные в фильтре I. Мы предполагаем, что остаток имеет вытянутую структуру, и его период вращения составляет около 640 дней. Вероятно, это гигантская контактная система, которая при дальнейшем развитии станет разделенной. Наблюдения не подтверждают предположение о том, что взрыв одного из компонентов V838 Моп является следствием слияния компонентов компактной двойной в иерархической тройной системе. Предложены две гипотезы о природе вспышки одного из компонентов V838 Моп, напрямую основанные на раннем возрасте этой системы: (1) включение термоядерного горения водорода в ядре после стадии гравитационного сжатия протозвезды; (2) фрагментация ядра внутри звезды при быстром вращении, обусловленном гравитационным сжатием протозвезды, а затем последовавшая дефрагментация (слияние компонентов ядра) из-за потери вращательного момента.

Ключевые слова: *звезды: новые, катаклизмические переменные — звезды: индивидуальные: V838 Моп*

1. ВВЕДЕНИЕ

V838 Моп была открыта во вспышке Н. Дж. Брауном (Brown et al. 2002), любителем астрономии из Австралии, 6 января 2002 г. (JD 2452281.1) на уровне блеска 10^m . Вспышка произошла между 26

декабря 2001 г., когда звезда была слабее 12^m , и 1 января 2002 г., блеск 9^m64 в фильтре RG1 (JD 2452269.777–2452275.762) (Bedient 2002). Это событие связали с новым классом звезд, которые при взрыве превращаются в холодные сверхгиганты (Stars Erupting into Cool Supergiants, SECS) (Munari et al. 2002a). Объекты этого класса

*E-mail: goray@sao.ru

также называют красными новыми высокой светимости (Luminous Red Novae, LRN), или просто красными новыми. По светимости в пике яркости они попадают в диапазон между классическими новыми и сверхновыми, и поэтому их относят к красным транзиентам промежуточной светимости (Intermediate Luminosity Red Transients, ILRT).

До открытия V838 Моп были известны два объекта такого класса: V1006/1007 (RV, Red Var) в галактике M31 и V4332 Sgr. Открытие первой красной новой в M31 оказалось такой неожиданностью, что в Общий каталог переменных звезд (ОКПЗ) эта звезда попала под двумя номерами даже при одинаковых координатах, так как в разных работах она была описана либо как классическая новая, либо как красный гигант переменного блеска. По сути, этот феномен представляет собой холодные взрывы, в то время как другие вспыхивающие звездные объекты в пике яркости обычно имеют самую высокую температуру.

Вспышка V838 Моп вызвала много вопросов, и одним из самых интригующих был вопрос о природе события и его предшественнике. При спектральных наблюдениях было обнаружено, что у взорвавшегося как красная новая объекта после вспышки остался спутник спектрального класса В3 V. Он в событии 2002 г. не участвовал и, более того, в его ходе не претерпел заметных изменений. В спектре, полученном на HST/STIS 9 февраля 2002 г. в области 2100–2400 Å в ультрафиолетовом диапазоне (Rauch et al. 2002, Fig. 1), виден избыток излучения от спутника В3 V. После вспышки, с октября 2002 г. по январь 2003 г., когда красная новая была в стадии коричневого сверхгиганта класса L (sgL) (Evans et al. 2003) и ее излучение сместилось в красный и инфракрасный диапазоны, спектр спутника В3 V наблюдался в широком диапазоне от 4000 до 6200 Å в чистом, не искаженном виде (Munari et al. 2007b, Fig. 2). В 2005 г. началось взаимодействие спутника В3 V с расширяющейся оболочкой красной новой, и в спектре V838 Моп появились эмиссионные линии [Fe II] (Barsukova et al. 2006). В конце 2006 г. спутник ушел в глубокое затмение (Goranskij 2006), в котором полностью исчез из суммарного спектра (Munari et al. 2007a), но вновь появился через 70 дней. Лишь в 2008 г. спутник окончательно исчез внутри оболочки красной новой (Goranskij and Barsukova 2008). Вспышка V838 Моп сопровождалась замечательным ярким световым эхом от межзвездной пылевой среды. По поляриметрическим наблюдениям эха удалось получить точные расстояния до звезды 6.1 ± 0.6 кпк и определить абсолютную величину в максимуме блеска $M_V = -9^m8$ (Sparks et al. 2008).

При анализе архивных данных было установлено, что блеск системы после вспышки уменьшился

почти на 1^m (см., например, Goranskij et al. (2004), Munari et al. (2005)) относительно уровня блеска до вспышки. Афшар и Бонд (Afşar and Bond 2007) обнаружили, что V838 Моп является членом малочисленного рассеянного скопления, включающего еще три звезды спектрального класса В в близких окрестностях, и подтвердили ослабление блеска остатка вспышки, предложив следующее «прозаическое объяснение». Предшественник состоял из единственной звезды В3 V и взорвавшегося компонента, который мог быть только звездой очень малой светимости по сравнению со звездой типа В3 V (но не типичной новоподобной катаклизмической переменной, имеющей более длительную эволюцию). Спутник В3 V был достаточно близок к взорвавшемуся компоненту, и ослабление его блеска объяснялось тем, что он частично погрузился в пыль, которая образовалась в большом количестве при взрыве и относительно медленно рассеивалась. Однако с обнаружением в спектре V838 Моп эмиссионных линий [Fe II] (Barsukova et al. 2006) стало ясно, что спутник является горячей звездой достаточно высокой светимости, чтобы испарить пыль и ионизовать вещество оболочки красной новой.

Мы предположили, что в системе V838 Моп до вспышки было две звезды типа В3 V, исходя из того наблюдательного факта, что показатели цвета $B - V$ предшественника и спутника, уцелевшего при взрыве, в пределах ошибок измерения одинаковы (Goranskij et al. 2007), но при этом блеск спутника после вспышки уменьшился примерно на 1^m . Если это предположение верно, то блеск и показатель цвета взорвавшегося компонента определяются из разности интенсивностей в фильтрах B и V до и после вспышки, то есть как потерянный свет. На архивных снимках в полосах B и V заметно, что в суммарном блеске пара звезд В3 V, входивших в систему V838 Моп до вспышки, слабее одиночной звезды АВ9 того же спектрального класса — члена скопления. Фотография в фильтре V , полученная сложением четырех снимков 1976–1977 гг. с наилучшим угловым разрешением, приведена на рис. 1 слева. Так что проблемой, требующей решения, остается необычно слабый блеск обоих компонентов этой пары.

Фотометрические и спектральные данные, имеющиеся для компонентов системы V838 Моп и звезд скопления, с учетом известного расстояния и межзвездного покраснения свидетельствуют о том, что взорвавшийся компонент V838 Моп находился точно на главной последовательности нулевого возраста (ZAMS) на диаграмме температура–светимость, а сохранившийся спутник — даже ниже ZAMS, в то время как звезды скопления являются проэволюционировавшими звездами главной последовательности (Barsukova et al. 2017).

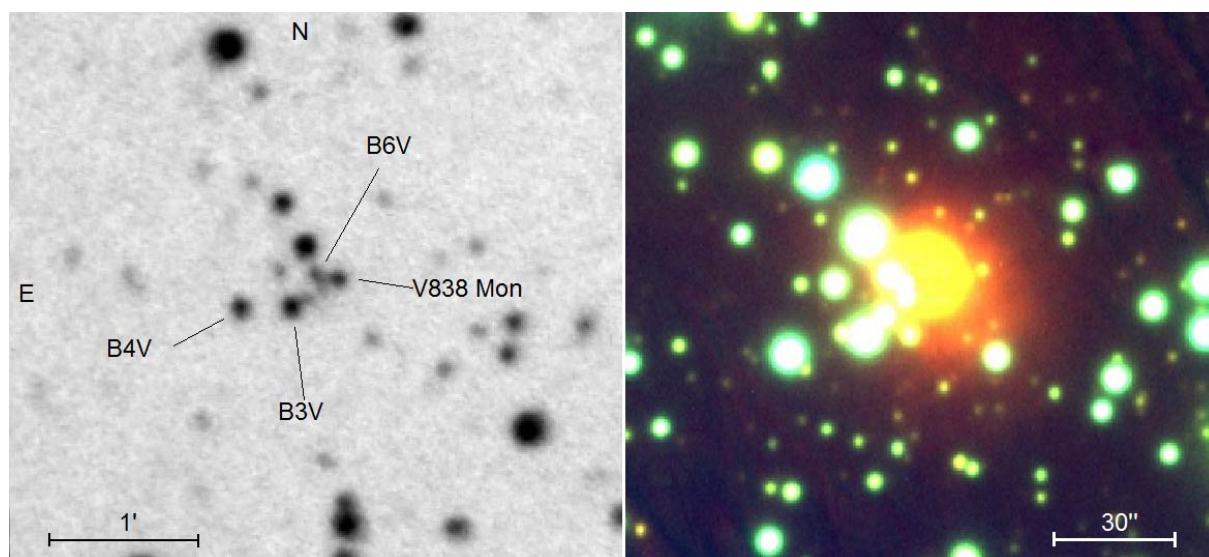


Рис. 1. Слева — фото предшественника взрыва V838 Моп в фильтре V , полученное суммированием четырех снимков на телескопе АЗТ-5 Крымской станции ГАИШ с наиболее высоким угловым разрешением в даты 27 марта 1976 г. (№ 3350), 29 марта 1976 г. (№ 3356), 9 апреля 1977 г. (№ 4191) и 22 сентября 1977 г. (№ 4636). Кроме предшественника V838 Моп, отмечены звезды скопления АВ7 (B6V), АВ8 (B4V) и АВ9 (B3V). Блеск звезды АВ9 (B3V) ярче суммарного блеска двух звезд класса B3V — компонентов V838 Моп. Справа — цветное фото остатка взрыва, полученное на 6-м телескопе БТА 12 февраля 2015 г. Фото в формате RGB составлено из трех кадров в фильтрах I_C , R_C и V , которые показаны соответственно красным, зеленым и синим цветами. Красный цвет туманности означает, что она видна только в инфракрасном фильтре I_C . Остаток взрыва — сверхгигант класса M — освещает пылевую туманность, по которой распространилась световое эхо от вспышки.

По результатам спектроскопии высокого разрешения и моделирования спектра (Kamiński et al. 2009) спутник B3V является звездой с солнечным содержанием элементов, с $T_{\text{eff}} \approx 18\,000\text{ K}$ и $\lg g \approx 4.0 \pm 0.75$. Ее абсорбционные линии значительно расширены, что в работе Kamiński et al. (2009) интерпретировалось как вращательное расширение со скоростью $v \sin i \approx 250 \pm 50\text{ км с}^{-1}$. Система V838 Моп находится в ранней стадии эволюции, что подтверждается наличием сильной линии $\text{Li I } 6708\text{ \AA}$ в ее спектре во вспышке (Goranskii et al. 2002), причем содержание элементов Li, Ba, La оказалось избыточным (Kipper et al. 2004, Munari et al. 2002b) по сравнению с солнечным. Система связана со скоплением и с пылевой туманностью. Предположения о том, что эта пыль — околозвездная материя, выброшенная в результате предыдущих вспышек звезды (Bond et al. 2003; 2004), — не подтвердились (Kamiński et al. 2011, Tylanda and Kamiński 2012). Туманность имеет большую массу, 90–150 M_{\odot} , и состоит из материала, оставшегося после образования скопления. Это также указывает на небольшой возраст V838 Моп — $(3\text{--}10) \times 10^6$ лет (Kamiński et al. 2011). Часть пылевой туманности, подсвеченная красным сверхгигантом — остатком взрыва, — наблюдалась через 13 лет после вспышки в ближнем ИК-диапазоне. Ее изображение, полученное в

фильтре I_C в декабре 2015 г. на телескопе БТА, показано на рис. 1 справа.

Для объяснения феномена красных новых — вспышек, подобных V838 Моп, — предлагались различные гипотезы. Это слияния звезд (мерджеры) (Soker and Tylanda 2003, Tylanda and Soker 2006); взрывы в центрах звезд; термоядерный взрыв в оболочке звезды в поздней стадии эволюции перед моментом зажигания углерода (Munari et al. 2005); очень поздняя гелиевая вспышка звезды в стадии пост-AGB (Lawlor 2005); вид классических новых с маломассивным холодным белым карликом с низким темпом аккреции со своего компонента (Shara et al. (2010), но не для LRN V838 Моп); или даже поглощение планет звездой-гигантом (Retter and Magom 2003). После открытия LRN V1309 Sco в 2008 г. и детального исследования ее кривых блеска до и во время вспышки по архивам гравитационно-линзового эксперимента OGLE (Tylanda et al. 2011a) взрывы, подобные V838 Моп, стали связывать только со слияниями компонентов в двойных или кратных системах. Авторы (Tylanda et al. 2011a) считают звезду V1309 Sco «Розеттским камнем» в исследовании природы вспышек типа V838 Моп. Действительно, за 6 лет до вспышки V1309 Sco наблюдалась как контактная система типа W UMa с орбитальным периодом порядка 1.44 дня. Этот период быстро и с ускорением сокращался при

постепенном увеличении яркости, затем звезда перешла в стадию общей оболочки. После спада блеска на 1^m в 2008 г., за полгода до открытия, система вошла в интенсивную фазу слияния с крутым подъемом блеска. Прослежены фазы максимума и спада блеска, в которых звезда проявила себя как красная новая. Эти наблюдения целиком подтвердили гипотезу слияния.

Однако интрига вокруг природы красных новых сохраняется. Исследования V838 Mon, которая наиболее хорошо изучена и даже считается прототипом объектов этого класса, показывают, что, в отличие от других красных новых, признаки слияния компонентов у нее отсутствуют. В работе Barsukova et al. (2017) приведены несколько фактов, не согласующихся с гипотезой о слиянии. Первый состоит в том, что архивные фотометрические данные в оптическом и ИК-диапазонах вплоть до 2.2 мкм (полоса K 2MASS), полученные до вспышки, не подтверждают наличия еще одного компонента, даже красного карлика (Goranskij et al. 2004). Не обнаружен источник света третьей звезды, которая могла бы участвовать в слиянии. Более того, светимость пары звезд В3 V (одна из которых при взрыве в системе V838 Mon уцелела) даже ниже присущей звездам такого спектрального класса.

Еще одним свидетельством против слияния является последующая эволюция системы. Расширяющийся остаток холодного сверхгиганта спустя пять лет поглотил второй компонент — уцелевший при вспышке спутник В3 V. Противоречит гипотезе слияния и отсутствие у V838 Mon постепенного повышения блеска перед вспышкой, которое обычно связано с усилением обмена массой между компонентами и с формированием общей оболочки. Такое повышение блеска типично для событий со слиянием компонентов и наблюдалось в системах V1309 Sco, V4332 Sgr, LRN 2015/M 31, а также у массивной LRN 2015/M 101. В работе Kimeswenger and Eyres (2006) был обнаружен спад блеска V838 Mon в 1998 г., за четыре года до вспышки, на 0^m461 в полосе R . В пересчете на чистый вклад взорвавшегося компонента (без спутника В3 V) амплитуда ослабления блеска составляла 1^m , что совпадает с амплитудой такого же ослабления блеска у V1309 Sco. В той же работе в 1999 г. обнаружен ослабленный блеск в полосе I на 0^m364 . Так что ослабление суммарного блеска пары звезд В3 V в системе V838 Mon началось до вспышки более яркого компонента.

В работе Barsukova et al. (2014) объяснение феномена красных новых основано на предположении Martini et al. (1999) о том, что подобную эволюцию спектра звезды может вызвать «медленный толчок» изнутри, который заставляет оболочку звезды двигаться наружу. Так как скорость

радиативного переноса в оболочках звезд значительно меньше скорости динамических изменений (распространения давления), то расширение оболочки от толчка из центра происходит в режиме, близком к адиабатическому. Скорость радиативного переноса зависит от пути свободного пробега квантов излучения, и она увеличивается при уменьшении плотности. При расширении тепловая энергия взрыва остается на дне оболочки, плотность тепловой энергии внутри нее падает из-за увеличения объема оболочки, и выход энергии на поверхность резко уменьшается. С адиабатическим расширением связано ослабление блеска звезды перед вспышкой. Когда плотность расширяющейся оболочки становится достаточно малой, тепловая энергия взрыва выходит на поверхность, но не может разогреть ее до высокой температуры, так как площадь поверхности в это время уже значительно увеличилась. Перенос тепловой энергии на поверхность по времени может продолжаться многие годы при малых скоростях расширения оболочек. Причиной медленного толчка может быть слияние ядер звезд в двойной системе или нестабильность в ядре одиночной звезды, в результате которой энергетический выход скачкообразно перейдет на более высокий уровень, или произойдет энергетический всплеск, после которого выход энергии из ядра вернется на прежний уровень. Во всех перечисленных случаях мы выделяем событие слияния звезд в двойной системе, основываясь на наблюдениях в фазе формирования общей оболочки перед вспышкой, когда происходит медленный подъем блеска. Если наклонение орбиты сливающейся системы к лучу зрения достаточно велико, и есть большие объемы архивных данных, подобно V1309 Sco, то при этом можно наблюдать резкое уменьшение периода орбиты и переход формы кривой блеска от двойной волны к одиночной. Тогда система от контактной типа W UMa переходит к системе в общей оболочке со звездами внутри и с пятном на поверхности. Если массы компонентов различны, то кроме возникновения общей оболочки возможна потеря массы и орбитального момента через точку Лагранжа L_2 в околос звездный диск. Слияние ядер звезд и медленный толчок изнутри вызывают резкое ослабление блеска из-за перехода общей оболочки в адиабатический режим расширения.

Новые открытия и исследования слияний компонентов в массивных двойных системах NGC 4490—OT 2011 (Smith et al. 2016) и PSN J14021678+5426205 = LRN 2015/M 101 (Goranskij et al. 2016a) несколько изменяют этот сценарий. При слиянии ядер массивных звезд на поверхность выходит ударная волна, которая разогревает поверхность общей оболочки до высокой температуры, когда оболочка еще имеет малый радиус. После всплеска яркости

от ударной волны общая оболочка по тому же сценарию переходит в режим адиабатического расширения, и блеск звезды уменьшается, а затем через некоторое время появляется вторичный максимум с признаками красной новой. Так что кривые блеска имеют двойной максимум. При слиянии компонентов массивных систем скорости расширения оболочек значительно выше, чем скорости оболочек маломассивных систем, и потому продолжительность фазы адиабатического расширения меньше, она составляет не годы, а месяцы. Гипотеза о том, что феномен красной новой есть всего лишь оболочечный эпизод, обусловленный толчком изнутри (независимо от природы этого толчка), может быть подтверждена взрывами SN II с коллапсом ядра (CCSN). Хороший пример — SN 1987A в БМО — взрыв горячего сверхгиганта Sanduleak –69° 202, у которого сначала наблюдался выход ударной волны в виде пика на кривой блеска в коротковолновых диапазонах, а затем широкий максимум в красных и ИК-лучах (Catchpole 1989). Различие оболочечных эпизодов между красными новыми малой и большой массы и сверхновыми CCSN состоит в скоростях расширения оболочек. CCSN имеют столь большие скорости, что оболочки сначала переходят в оптически тонкую фазу, а затем сбрасываются совсем. Вопрос о судьбе расширяющихся оболочек красных новых пока не ясен, и для его решения нужны длительные фотометрические и спектральные наблюдения за остатками подобных холодных взрывов в оптическом и ИК-диапазонах. Возможно, эти наблюдения дадут ответ на вопросы о предшественниках взрывов и о природе самих взрывов. В настоящей работе мы попытались ответить на них, проанализировав архивные данные, результаты рядов фотометрических и спектральных наблюдений, сведения из литературных источников для события LRN 2002 г. V838 Mon, остаток которой наблюдается нами 16 лет.

2. ФОТОМЕТРИЯ И АРХИВНЫЕ ДАННЫЕ

Фотометрические наблюдения V838 Mon в настоящей работе проводились всеми доступными приборами и методами. В основном использовались телескопы с зеркалами диаметром 0.5–6.0 м и с ПЗС-приемниками с фильтрами в системах *UBVRI* Джонсона (*J*) и *RI* Козинса (*C*). Это очень разнородные ряды наблюдений, которые невозможно привести к одной стандартной системе с использованием уравнений цвета, полученных для обычных звезд, так как спектры остатка взрыва V838 Mon, холодной кислородной звезды-сверхгиганта, имеют глубокие и широкие молекулярные полосы с резкими краями, и потому

измерения показывают сильную зависимость от малых отклонений кривых реакции приборов от стандартных кривых реакции. Поэтому мы выбрали наиболее однородный и продолжительный по времени ряд наблюдений на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН с ПЗС-фотометром и фильтрами *UBV(RI)_C* и свели остальные ряды наблюдений в систему САО РАН, определяя поправки по одновременным или близким по времени данным. Мы не смогли контролировать усовершенствования всех приборов (смену системы фильтров и ПЗС-чипов, температурный режим) в разных обсерваториях, но обнаружили, что поправки меняются со временем.

Список обсерваторий, в которых проводились наблюдения V838 Mon, а также телескопов, приборов, фильтров, ПЗС-матриц приведен в примечаниях к таблице 1, полностью таблица представлена в интернете^{1, 2}. На первом сайте графики кривых блеска и показателей цвета можно изучать и рассматривать в деталях с помощью браузера, совместимого с Java³. На 6-м телескопе БТА фотометрические данные получены с фокальным редуктором SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2005) в полосах системы *BV(RI)_c* при проведении спектральных наблюдений в конфигурации «прямые изображения—длинная щель». Заметим, что фотометрические наблюдения V838 Mon в полосе *U* с октября 2008 г. стали возможны только на телескопе Цейсс-1000 САО РАН с *UBVRI*-фотометром после того, как компонент *B3 V* исчез из спектра звезды, и блеск звезды упал до 21^m. При этом накопление сигнала в полосе *U* продолжалось 1–2 часа, и была достигнута точность измерений 0^m2. Для привязки фотометрических наблюдений был использован стандарт Munari et al. (2005). Кадры ПЗС были обработаны с помощью компьютерной программы WinFITS (автор В.П.Г.) в апертурном режиме. При этом профили изображений звезды очищались от космических частиц или от накладывающихся близких звездных изображений. В автоматическом режиме для чистки профилей изображений применялся метод минимизации дисперсии функции интенсивность—расстояние пикселя до центра изображения звезды и определялось положение центра звезды. Затем значения пикселей, выпадающие за 3σ , обнулялись, а в следующем цикле расчетов заменялись на средние значения функции для данного расстояния. Имеется возможность очистки профилей изображений вручную. Подобный алгоритм использовался

¹<http://vgoranskij.net/v838mon/table1.dat>

²<http://www.sao.ru/hq/bars/v838mon/>

³<http://vgoranskij.net/v838mon.htm>

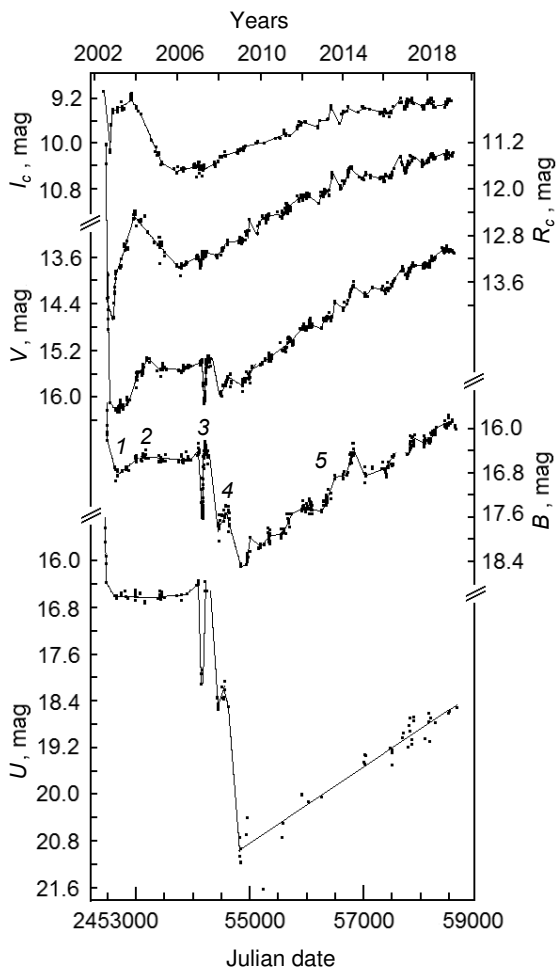


Рис. 2. Кривые блеска остатка красной новой V838 Моп в фильтрах системы $UBV(RI)_C$ (снизу вверх). Цифрами над кривой блеска в B отмечены основные стадии эволюции остатка: 1 — коричневый L-сверхгигант + спутник V3 V; 2 — поздний M-сверхгигант + спутник V3 V и его отраженный свет, сближение спутника с расширяющимся M-сверхгигантом, появление спектра с эмиссионными линиями [Fe II]; 3 — вспышка эмиссионного спектра и затмение спутника V3 V; 4 — движение спутника V3 V в пустоте под внешним слоем M-сверхгиганта; 5 — спутник V3 V внутри M-сверхгиганта.

для измерений кадров с плохими изображениями ($FWHM > 3''$).

Точность фотометрии в фильтре U находится в пределах 0^m02-0^m2 , в фильтре B — в пределах 0^m02-0^m10 , в фильтре V — в пределах 0^m02-0^m04 , в фильтрах R_C и I_C — в пределах 0^m01-0^m03 . Всего в период JD 2452552–2458610 проведено 1016 наблюдений.

Для анализа кривых блеска мы использовали также опубликованные данные из работ Bond (2006), Crause et al. (2003; 2005), Goranskii et al. (2002), Kimeswenger et al. (2002), Kolka et al.

(2009), Munari et al. (2007a; 2002b), Wagner et al. (2003). Поправки для приведения данных от различных приборов и источников в единую систему Цейсс-1000 САО РАН менялись в следующих пределах: в фильтре B от 0^m00 до $+0^m19$, в фильтре V от $+0^m03$ до $+0^m55$, в фильтре R_C от -0^m31 до $+0^m33$, в фильтре I_C от -0^m21 до $+0^m28$. Кривые блеска в фильтрах системы $UBV(RI)_C$ показаны на рис. 2, кривые показателей цвета в сравнении с кривой блеска в фильтре V — на рис. 3.

Для исследования предшественника взрыва мы использовали архивы фотопластинок из Московской коллекции ГАИШ МГУ и коллекции Зоннебергской обсерватории (Германия). В полосе B негативы из московской коллекции получены на 40-см астрографе Крымской станции ГАИШ МГУ ($D = 40$ см, $f = 160$ см, поле зрения 10°), негативы зоннебергской коллекции — на том же 40-см астрографе или на точной его копии. Во всех случаях использовались крупнозернистые эмульсии AGFA Astro или ORWO ZU-2/ZU-21. Угловое разрешение на этих снимках в лучших случаях $6''$. Экспозиции снимков московской коллекции составляли 45 мин., зоннебергской коллекции — 30 мин. В московской коллекции нашлось 23 негатива, пригодных для измерений. Они относятся к временному диапазону JD 2440292–2449394 (1969–1994 гг.). В зоннебергской коллекции более 100 снимков в основном более низкого качества из-за меньших экспозиций, более низкой высоты объекта над горизонтом в Зоннеберге и большей атмосферной экстинкции. В тех случаях, когда в ночь было получено две или несколько пластинок подряд, мы складывали изображения с этих пластинок, чтобы накопить большой сигнал. Всего мы получили 96 измерений во временном диапазоне JD 2426039–2448329 (1930–1991 гг.). Первые негативы V838 Моп зоннебергской коллекции, на которых изображение объекта видно, но непригодно для измерений из-за слабого предела, относятся к 1928 г. Эти снимки особенно ценны, и поэтому блеск звезды на них и на других слабых кадрах был оценен глазомерным способом одним из авторов (С.Ю.Ш.). Последние пластинки V838 Моп получены в 1994 г. Ряды этих наблюдений закончились из-за прекращения производства астрономических эмульсий везде в мире и истощения их запасов в обсерваториях. Мы измерили звезду в полосе B на снимках цифровых обзоров неба по сканам DSS и SuperCOSMOS.

По счастливой случайности V838 Моп попала на пластинки, полученные в полосе V на 50-см менисковом телескопе АЗТ-5 системы Максутова Крымской станции ГАИШ МГУ, в область с центром близ звезды 20 Моп ($7^h10^m13^s$, $-4^\circ14'$, 2000) (наблюдатель С.Ю.Ш.). Параметры этого

Таблица 1. ПЗС-фотометрия V838 Моп. Фрагмент таблицы

JD hel.24...	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	R_C/R_J	I_C/I_J	Device
52552.5715	-	16.780	16.209	13.765	9.660	SO
52556.5666	-	-	16.181	13.797	9.670	SO
52556.5742	-	-	16.184	-	-	SO
52558.5418	-	-	16.258	13.679	-	SO
52594.5427	-	-	16.249	11.131	-	C7
52595.5364	-	-	16.199	11.120	-	C7
52620.4484	-	-	16.145	10.993	-	C7
52621.4344	-	-	16.137	10.987	-	C7
52667.4114	-	-	16.136	13.195	9.390	SO
52667.4191	-	-	16.118	-	9.350	SO
52667.4278	-	-	16.211	-	-	SO
52727.3056	-	16.680	15.991	12.989	-	SO
52729.1929	-	-	-	12.964	-	SO
52729.1969	-	16.710	16.048	12.932	9.240	SO
52730.1981	16.52	16.735	16.123	12.958	-	SO
52730.2014	-	16.734	-	-	-	SO
52906.5971	-	-	15.830	10.762	8.130	C7
52911.6060	-	-	15.710	10.770	8.140	C7
52913.5499	16.50	16.532	15.592	12.385	9.150	SO
...

В столбце Device обозначения следующие:

- 47 — SAI Crimean Station, 60-cm Zeiss telescope, $BV(RI)_C$, CCD Apogee-47p;
- 4J — SAI Crimean Station, 60-cm Zeiss telescope, $BV(RI)_J$, CCD Apogee-47p;
- 6m — SAO RAS, 6-m telescope BTA, SCORPIO, $BV(RI)_C$, CCD EEV42-40;
- A5 — SAI Crimean Station, 50-cm meniscus Maksutov telescope, $BV(RI)_C$, CCD Apogee Alta U8300;
- A7 — SAI Crimean Station, 60-cm Zeiss telescope, $BV(RI)_J$, CCD Apogee VersArray;
- As — SAI Crimean Station, 60-cm Zeiss telescope, $BV(RI)_C$, CCD Apogee Aspen;
- C7 — SAI Crimean Station, 60-cm Zeiss telescope, $BV(RI)_J$, CCD SBIG ST-7;
- D7 — SAI Crimean Station, 60-cm Zeiss telescope, $BV R_C I_J$, CCD SBIG ST-7;
- MM — SAO RAS, 1-m Zeiss telescope, $BV(RI)_C$, MultyMode Photometer Polarimeter;
- P5 — SAI Crimean Station, 50-cm meniscus Maksutov telescope, $BV(RI)_C$, CCD MEADE Pictor-416;
- SH — Stara Lesna Observatory (Slovakia), G1/G2 telescope, $BV(RI)_C$, CCD ST-10;
- SK — Stara Lesna Observatory (Slovakia), G1/G2 telescope, $BV(RI)_C$, CCD FLI-2;
- SO — SAO RAS, 1-m Zeiss telescope, $BV(RI)_C$, CCD Electronika-575 & EEV 42-40;
- SP — Stara Lesna Observatory (Slovakia), G1 telescope, $BV(RI)_C$, CCD FLI-2;
- SV — Stara Lesna Observatory (Slovakia), G2 telescope, $BV(RI)_C$, CCD FLI-2;
- VA — SAI Crimean Station, 60-cm Zeiss telescope, $BV(RI)_C$, CCD Apogee VersArray;
- VJ — SAI Crimean Station, 60-cm Zeiss telescope, $BV(RI)_J$, CCD Apogee VersArray.

Таблица 2. Архивная микрофотометрия V838 Моп по пластинкам обсерватории Зоннеберг

JD hel.24...	<i>B</i>	σ	<i>q</i>	Plate №	JD hel.24...	<i>B</i>	σ	<i>q</i>	Plate №
26039.342	15.66	0.17	3	A1282	30792.400	15.65	0.11	3	GA1280
26308.561	15.32	0.19	2	A1419	30793.373	15.63	0.11	4	GA1286
26634.619	15.70	0.16	2	A1629	31145.336	15.61	0.15	3	GA1461
26694.568	15.46	0.14	2	A1656	38373.550	15.63	0.11	3	GC0948
26744.355	15.23	0.19	1	A1697	39466.538	15.64	0.09	4	GC1596
26769.329	15.32	0.19	1	A1728	39500.418	15.79	0.15	3	GC1600
27578.591	15.80	0.10	4	GA0434	39508.416	15.75	0.11	5	GC1602/03
27718.640	15.55	0.23	1	A2353	39508.509	15.80	0.08	5	X2284
27719.640	15.58	0.19	1	A2358	39531.345	15.81	0.14	5	GC1621
27746.633	15.37	0.20	1	A2369	39535.355	15.76	0.10	4	GC1631
29633.423	15.64	0.17	3	GA0462	39537.380	15.56	0.12	2	GC1643-46
29633.512	15.84	0.17	2	GA0464	42452.278	15.83	0.11	4	GC2990
29634.474	15.45	0.22	2	GA0471	42452.348	15.68	0.13	5	GC2991
29634.564	15.45	0.14	2	GA0473	42452.417	15.77	0.12	5	gc2992
29635.427	15.39	0.16	2	GA0478	42838.295	15.81	0.10	5	GC3166
29635.604	15.74	0.15	2	GA0482	42838.351	15.81	0.13	5	GC3167
30734.434	15.95	0.09	3	GA1218	42838.400	15.31	0.15	3	GC3168
30735.363	15.50	0.11	4	GA1220	44256.438	15.57	0.19	3	GC3885
30735.406	15.74	0.11	3	GA1221	44256.452	15.89	0.23	3	GC3886
30735.474	15.62	0.14	4	GA1222	44290.398	15.85	0.12	3	GC3922/23
30735.562	15.59	0.16	3	GA1223	45021.330	15.52	0.13	4	GC4409/10
30784.338	15.80	0.11	5	GA1246	45045.308	15.73	0.12	5	GC4460/61
30784.380	15.68	0.13	5	GA1247	45055.349	15.64	0.13	4	GC4521/22
30784.423	15.85	0.12	5	GA1248	45672.576	15.79	0.14	4	GC5182/83
30784.465	15.47	0.12	4	GA1249	45674.588	15.50	0.08	3	GC5213/14
30787.311	15.52	0.13	3	GA1252	45779.345	15.50	0.14	5	GC5338
30787.353	15.84	0.11	2	GA1253	46004.593	15.76	0.12	5	GC5784
30787.395	15.61	0.12	3	GA1254	46005.565	15.72	0.15	5	GC5802
30788.302	15.75	0.12	2	GA1260	46005.641	15.70	0.11	5	GC5807
30789.304	15.76	0.09	3	GA1267	46006.555	15.41	0.14	3	GC5816
30791.303	15.78	0.13	4	GA1270	46006.639	15.60	0.14	5	GC5822
30791.384	15.58	0.14	3	GA1272	46034.573	15.74	0.15	3	GC5853

Таблица 2. (Продолжение)

JD hel.24...	<i>B</i>	σ	<i>q</i>	Plate №	JD hel.24...	<i>B</i>	σ	<i>q</i>	Plate №
46036.537	15.45	0.15	3	GC5869	47205.355	15.44	0.23	3	GC8287
46036.610	15.77	0.13	4	GC5874	47206.363	15.31	0.18	2	GC8314
46059.474	15.81	0.15	5	GC5908	47207.342	15.60	0.15	5	GC8340
46059.580	15.82	0.16	5	GC5916	47566.437	15.80	0.13	5	GC8875
46093.329	15.50	0.12	4	GC5956	47592.351	15.81	0.13	5	GC8917
46093.501	15.53	0.20	3	GC5967	47858.601	15.67	0.07	5	GC9419
46113.437	15.55	0.22	4	GC6051	47861.511	15.80	0.12	5	GC9502
46121.303	15.60	0.17	3	GC6109	47946.325	15.60	0.15	5	GC9567
46121.316	15.75	0.19	3	GC6110	47967.320	15.58	0.13	5	GC9581/2
46385.566	15.62	0.13	3	GC6599	47968.327	15.59	0.13	5	GC9587
46440.407	15.60	0.17	2	GC6687	47969.310	15.70	0.11	5	GC9599/9600
46489.327	15.53	0.19	2	GC6825	48271.427	15.97	0.12	2	GC9925
46716.613	15.73	0.18	3	GC7387	48273.551	15.56	0.11	2	GC9979
46826.363	15.55	0.21	3	GC7616	48274.428	15.68	0.11	2	GC9997
46877.314	15.75	0.23	3	GC7842	48322.285	15.72	0.14	5	GC10057
46877.330	15.64	0.22	3	GC7843	48329.316	15.85	0.20	5	GC10072

телескопа: $f = 200$ см, поле зрения $2^{\circ}2'$, угловое разрешение в лучших случаях $2''5$. Всего таких пластинок 51. Это эмульсия Kodak 103aD с фильтром ЖС-17, что обеспечивает стандартную систему *V* Джонсона. Снимки получены в период JD 2442805–2443935 (1976–1979 гг.), причем 44 из них сконцентрированы в интервале времени 15 месяцев. Это достаточно малый интервал для поиска возможного орбитального периода с учетом того, что перед слиянием компонентов в двойной системе период постепенно уменьшается (подобно V1309 Sco).

Для измерений блеска звезды на пластинках 40-см астрографа Зоннебергской обсерватории использовалась камера FinePix F10 в черно-белом формате, и цифровые изображения были получены в формате JPEG. По пластинкам 40-см астрографа и АЗТ-5 Крымской станции ГАИШ мы оцифровали окрестности V838 Mon со сканером Eastman Kodak CREO в формате TIFF. Затем кадры в JPEG и TIFF переформатировались в FITS и обрабатывались с помощью программы WinFITS (В.П.Г.), настроенной для считывания кадров FITS. Для микрофотометрии мы расширили стандарт Munari et al. (2005) на большее количество окрестных звезд сравнения со звезд-

ными величинами, близкими к величине V838 Mon, достаточное для построения характеристических кривых. Для анализа характеристических кривых была составлена компьютерная программа, которая приближает зависимость отсчет–звездная величина многочленом n -й степени. Как правило, для представления было достаточно значения $n = 1$ или 2 . Для оценки точности использовалось среднеквадратичное отклонение величин звезд сравнения от функции многочлена. Одновременно делались визуальные оценки качества негативов по угловому разрешению и пределу видимости звезд в баллах от 1 до 5. Результаты измерений приведены в таблицах 2 и 3 в фильтре *B* соответственно для московских и зоннебергских негативов. Результаты измерений в фильтре *V* даны в таблице 4. Кривые блеска показаны на рис. 4.

3. СПЕКТРОСКОПИЯ

Спектры V838 Mon среднего и низкого разрешения были получены на телескопах БТА и Цейсс-1000 САО РАН со спектрографом Zeiss UAGS (дифракционные решетки 1302 и R400) и с фокальным редуктором SCORPIO (гризмы VPHG550G, VPHG1200G, VPHG1200R)

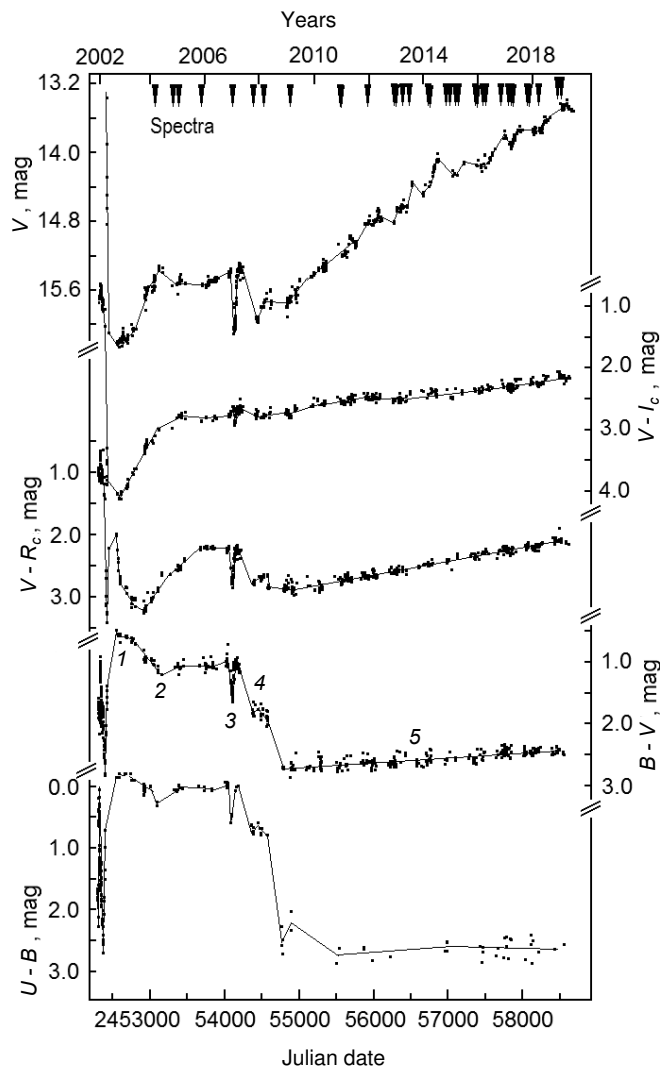


Рис. 3. Кривая блеска остатка красной новой V838 Моп в фильтре V (вверху) и кривые показателей цвета системы $UBV(RI)_C$. Цифрами около кривой показателя цвета $B - V$ отмечены основные стадии эволюции остатка, те же, что и на рис. 2. Вверху рисунка указателями и надписью «Spectra» отмечены моменты получения спектров на телескопах БТА и Цейсс-1000.

Таблица 3. Архивная микрофотометрия V838 Моп по пластинкам фототеки ГАИШ в Москве в полосе B

JD hel.24...	B	σ	q	Plate №	JD hel.24...	B	σ	q	Plate №	JD hel.24...	B	σ	q	Plate №
40292.326	15.81	0.14	4	A06193	48294.384	15.70	0.23	3	A20358	48325.259	15.62	0.11	3	A20394
46764.541	15.67	0.11	5	A17702	48295.396	15.59	0.19	2	A20364	48716.381	15.71	0.12	4	A20970
46764.574	15.84	0.13	4	A17703	48297.371	15.54	0.11	4	A20368	48923.305	15.88	0.10	5	A21321
48244.399	15.65	0.11	3	A20280	48298.374	15.69	0.09	5	A20372	49031.371	16.13	0.14	4	A21368
48250.464	15.73	0.11	5	A20306	48327.319	15.76	0.10	4	A20411	49359.424	15.67	0.15	3	A21788
48273.392	15.65	0.15	3	A20336	48325.259	15.70	0.12	4	A20399	49362.400	15.72	0.10	5	A21804
48274.362	15.64	0.12	3	A20345	48351.265	15.65	0.11	3	A20383	49394.325	15.79	0.12	4	A21819
48276.382	15.65	0.16	3	A20352	48320.301	15.89	0.08	5	A20380					

Таблица 4. Архивная микрофотометрия V838 Mon по пластинкам фототеки ГАИШ в Москве в полосе V

JD hel.24...	V	σ	q	Plate №	JD hel.24...	V	σ	q	Plate №	JD hel.24...	V	σ	q	Plate №
42805.303	15.16	0.02	5	3176	42870.248	15.27	0.08	5	3383	43192.316	15.25	0.04	4	4090
42805.322	15.33	0.20	2	3177	42872.243	15.28	0.12	4	3405	43192.494	15.20	0.10	2	4098
42807.326	15.37	0.05	4	3192	42873.239	15.29	0.10	4	3417	43195.344	15.41	0.10	3	4110
42807.411	15.18	0.10	4	3194	42873.332	15.21	0.03	4	3419	43195.362	15.25	0.04	5	4111
42812.275	15.23	0.10	4	3202	42890.277	15.02	0.2	2	3463	43199.205	15.27	0.03	4	4136
42813.283	15.38	0.05	4	3225	42892.272	15.15	0.10	5	3479	43199.221	15.26	0.08	4	4137
42817.312	15.14	0.10	2	3254	43026.570	15.35	0.10	2	3681	43199.236	15.44	0.12	3	4138
42817.335	15.13	0.08	3	3255	43043.424	15.27	0.12	3	3765	43242.234	15.28	0.04	4	4181
42826.254	15.03	0.2	3	3278	43046.561	15.12	0.13	3	3837	43243.241	15.23	0.09	5	4191
42827.304	15.13	0.10	4	3284	43048.522	15.19	0.05	3	3853	43256.262	15.50	0.20	2	4245
42828.237	15.42	0.08	5	3287	43049.550	15.34	0.05	4	3875	43407.576	15.39	0.05	4	4618
42828.357	15.20	0.10	5	3292	43055.598	15.30	0.07	5	3913	43408.581	15.19	0.15	1	4631
42828.374	15.23	0.10	4	3293	43056.545	15.22	0.12	3	3915	43408.589	15.43	0.10	5	4636
42829.249	15.25	0.08	4	3298	43183.237	15.18	0.07	4	4023	43433.600	15.37	0.10	1	4781
42865.286	15.31	0.10	5	3350	43185.285	15.20	0.06	5	4029	43931.409	15.38	0.10	4	5316
42867.238	15.29	0.08	5	3356	43188.259	15.35	0.10	5	4046	43933.402	15.34	0.04	5	5333
42867.258	15.35	0.11	5	3357	43190.347	15.28	0.12	4	4072	43935.421	15.23	0.15	4	5371

(Afanasiev and Moiseev 2005). В период с 18 февраля 2004 г. по 16 ноября 2018 г. (JD 2453054–2458438) получено 38 спектров в различных диапазонах в пределах $\lambda 3761\text{--}7887 \text{ \AA}$ со спектральным разрешением в пределах $1.6\text{--}20 \text{ \AA}$ ($R \sim 300\text{--}3000$) и с отношением S/N в пределах $5\text{--}150$. Спектры обработаны в среде MIDAS в ОС LINUX и калиброваны с помощью спектрофотометрических стандартов ESO и наших фотометрических данных с переводом в плотности потоков в шкале $10^{-16} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$. Наблюдатели А.Н.Б, А.Ф.В. и В.П.Г. Список спектров и их параметров приведен в таблице 5, в цифровом формате спектры доступны в интернете^{4, 5}. На рис. 3 моменты получения спектров отмечены на кривых блеска и показателей цвета. Спектры попадают на все основные стадии эволюции остатка взрыва V838 Mon, кроме стадии коричневого сверхгиганта (sgL). Оптические и ИК-спектры в стадии sgL имеются в работах Evans et al. (2003), Munari et al. (2007b).

⁴<http://vgoranskij.net/v838mon/SPECTRA.zip>

⁵<http://www.sao.ru/hq/bars/v838mon/>

Выборка наших спектральных наблюдений в разных стадиях эволюции представлена на рис. 5 в диапазоне $4000\text{--}5800 \text{ \AA}$ и на рис. 6 в диапазоне $5700\text{--}7100 \text{ \AA}$. Отождествление основных линий металлов и молекулярных полос на этих снимках сделаны на основе спектров высокого разрешения, опубликованных Kamiński et al. (2009), Tyłenda et al. (2011b). Коротковолновая часть оптических спектров V838 Mon $\lambda 4050\text{--}4650 \text{ \AA}$ с достаточно высоким отношением S/N показана на рис. 7 в сравнении со спектром остатка другой красной новой — V4332 Sgr.

4. ПРЕДШЕСТВЕННИК

Кривые блеска предшественника взрыва V838 Mon по архивным данным показаны на рис. 4. Фотографические наблюдения в системе V охватывают интервал времени в 66 лет между 1928 г. и 1994 г. (внизу). Две звездочки на этом рисунке — наблюдения по архивам DSS. Они расположены заметно ниже средней величины остальных наблюдений. Это связано с низким угловым разрешением на пластинках 40-см астрографов, на

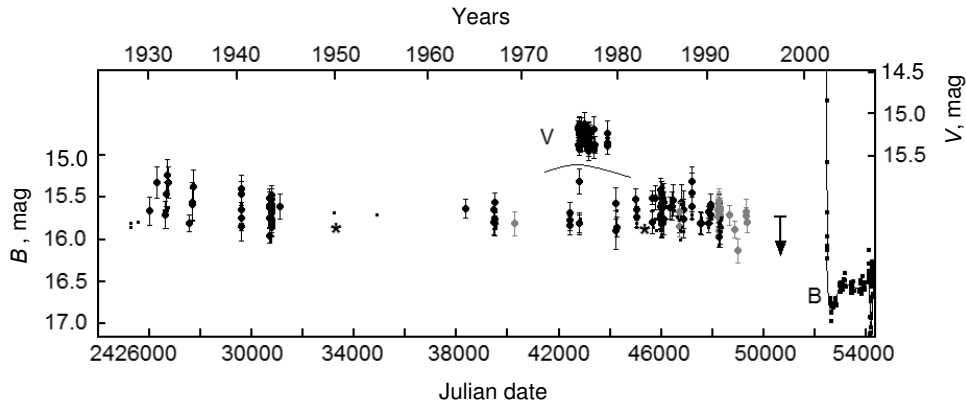


Рис. 4. Архивные наблюдения предшественника красной новой V838 Моп в фильтре B (внизу) и V (вверху). Наблюдения фототеки ГАИШ (Москва) в фильтре B выделены серыми значками. Точки — глазомерные оценки блеска по пластинкам обсерватории в Зоннеберге. Звездочки — измерения по цифровым обзорам неба DSS и SuperCOSMOS. Стрелка, направленная вниз, показывает момент и амплитуду ослабления в фильтре R , обнаруженного Kimeswenger and Eyres (2006). Вспышка 2002 г. не показана. Справа — наблюдения падения блеска в фильтре B и фазы коричневого сверхгиганта (в минимуме блеска в B сразу после вспышки виден только спутник В3 V).

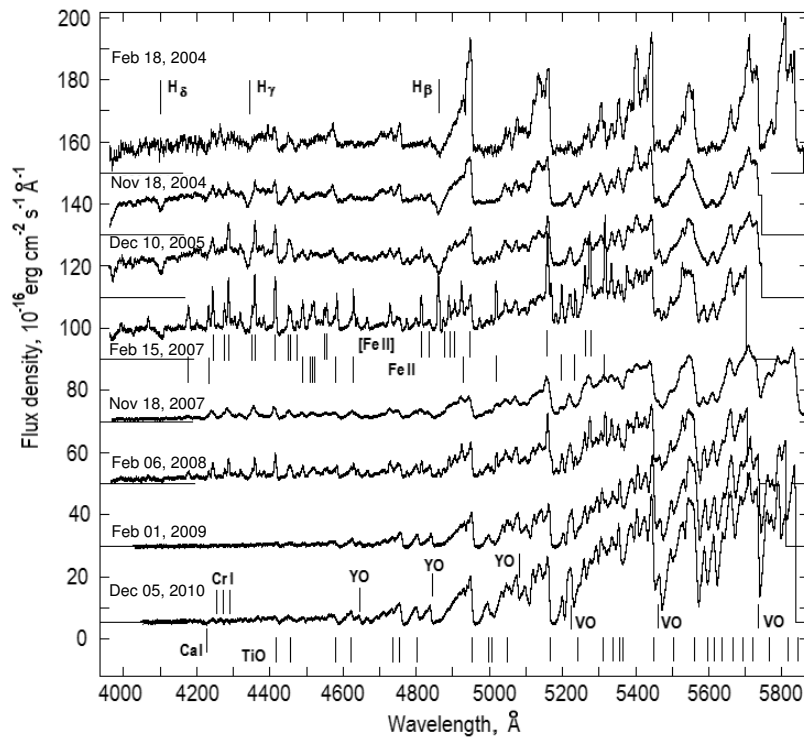


Рис. 5. Спектральные изменения в коротковолновой части оптического спектра остатка взрыва V838 Моп в период между 2004 г. и 2010 г. Горизонтальной линией слева под каждым спектром показан нулевой уровень плотности потока излучения. Подъем спектра над нулевым уровнем отражает вклад спутника В3 V, так как вклад холодного остатка взрыва sgM на этом участке спектра ничтожен. Наблюдения охватывают следующие события: сближение спутника В3 V с передним фронтом расширяющейся оболочки красной новой (2004–2005 гг.); погружение спутника во внешний слой оболочки, сброшенной при взрыве (февраль 2007 г.); движение спутника в пустоте под этим слоем (ноябрь 2007 г., февраль 2008 г.); погружение спутника в основное тело остатка взрыва и исчезновение его спектра (февраль 2009 г. и позднее). Отмечены балмеровские линии спутника В3 V, эмиссии ионизованного спутником железа в оболочке, молекулярные полосы sgM .

Таблица 5. Спектры V838 Моп, полученные на БТА и Цейсс-1000 САО РАН

Date UT	JD hel. 24...	Exposure, s	Range, Å	Resolution, Å	Grating/ Grizm	Δv_r , km s ⁻¹	S/N	Telescope device
Feb 18, 2004	53054.239	3600	3800–6953	4.3	1302	-18	5	6m UAGS
Nov 18, 2004	53328.426	2400	3970–5730	4.6	VPHG1200G	+21	100	6m SCO
Jan 15, 2005	53386.29		5613–7108	4.6	VPHG1200R	-3	26	6m SCO
Dec 10, 2005	53715.535	4800	3960–5744	7.0	VPHG1200G	+13	90	6m SCO
Feb 15, 2007	54147.273	900	3929–5744	6.0	VPHG1200G	-18	60	6m SCO
Nov 18, 2007	54423.433	1800	3669–7569	15.0	VPHG550G	+21	50	6m SCO
Feb 06, 2008	54503.319	2100	3933–5705	5.9	VPHG1200G	-14	80	6m SCO
Feb 21, 2009	54884.320	2400	4026–5811	4.6	VPHG1200G	-19	70	6m SCO
Dec 06, 2010	55536.520	2226	4048–5838	6.2	VPHG1200G	+15	12	6m SCO
Dec 07, 2010	55537.529	660	5739–7493	6.0	VPHG1200R	+13	120	6m SCO
Dec 23, 2011	55919.447	1800	4062–5938	4.4	VPHG1200G	+7	20	6m SCO
	55919.536	1030	3950–7885	20.0	VPHG550G	+7	45	6m SCO
Nov 22, 2012	56254.558	4800	5671–7057	1.6	1302	+19	26	1m UAGS
Nov 25, 2012	56256.594	2270	4876–6280	1.8	1302	+19	12	1m UAGS
Feb 19, 2013	56343.366	2400	5395–6700	1.7	1302	-18	12	1m UAGS
May 02, 2013	56415.241	1200	3980–7896	15.8	VPHG550G	-25	60	6m SCO
Feb 08, 2014	56697.257	2410	4051–5847	5.9	VPHG1200G	-14	100	6m SCO
Feb 11, 2014	56700.390	4800	5584–6962	2	1302	-15	22	1m UAGS
Nov 06, 2014	56967.535	4800	4416–5218	1.7	1302	+24	10	1m UAGS
Nov 07, 2014	56968.613	4800	5618–7015	1.7	1302	+24	16	1m UAGS
Dec 02, 2014	56993.547	3600	4308–5207	2.0	1302	+16	8	1m UAGS
Jan 30, 2015	57053.393	4800	5616–7011	1.5	1302	-10	30	1m UAGS
Feb 24, 2015	57078.219	2400	4053–5845	5.8	VPHG1200G	-20	50	6m SCO
Dec 16, 2015	57373.428	2700	3761–7896	13.6	VPHG550G	+11	65	6m SCO
Dec 19, 2015	57376.496	2400	5728–7129	1.9	1302	+9	75	1m UAGS
Feb 02, 2016	57421.413	2728	4222–5303	9.4	1302	-12	12	1m UAGS
Feb 29, 2016	57448.330	2400	5584–6982	2.5	1302	-21	38	1m UAGS
Mar 01, 2016	57449.327	3600	4100–5089	2.8	1302	-22	15	1m UAGS
Mar 26, 2016	57474.212	1272	5584–6987	2.6	1302	-26	16	1m UAGS
Nov 02, 2016	57695.521	2150	3740–7887	13.3	VPHG550G	+25	150	6m SCO
Feb 05, 2017	57790.313	3183	5745–7140	1.6	1302	-13	35	1m UAGS
Mar 05, 2017	57818.341	3000	5765–7162	1.6	1302	-23	30	1m UAGS
Mar 06, 2017	57819.269	3000	5762–7162	1.8	1302	-23	110	1m UAGS
Nov 26, 2017	58083.535	2400	4500–7855	8.4	R400	+19	50	1m UAGS
Nov 27, 2017	58084.581	4500	4400–5504	2.1	1302	+18	10	1m UAGS
Feb 07, 2018	58157.309	2400	5732–7123	2.0	1302	-14	30	1m UAGS
Oct 17, 2018	58408.603	1820	4204–7745	8.6	R400	+27	15	1m UAGS
Nov 16, 2018	58438.592	3100	4200–5290	6.0	1302	+21	60	1m UAGS

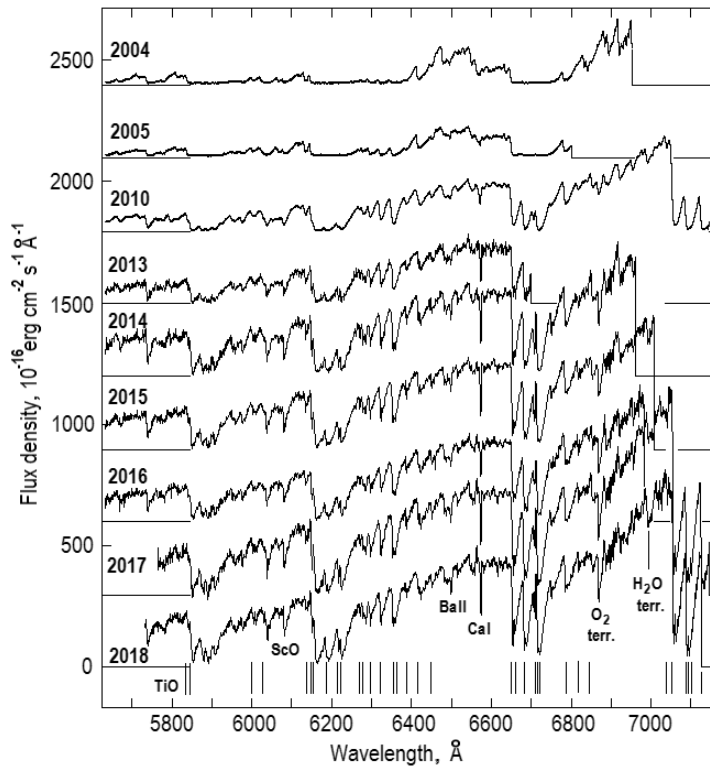


Рис. 6. Спектральные изменения в длинноволновой части оптического спектра остатка взрыва V838 Моп в период между 2004 г. и 2018 г. Доминируют молекулярные полосы М-сверхгиганта. Отмечены также наиболее сильные абсорбционные линии сверхгиганта, которые использовались для определения лучевой скорости. Отрезками горизонтальной линии и цифрами отмечены уровни нуля плотности потока и год получения для каждого спектра.

которых изображение V838 Моп сливается с двумя соседними слабыми звездами. В 2002 г. и далее нанесены наблюдения V838 Моп в фильтре *B* на спаде блеска, где минимальный блеск соответствует фазе коричневого сверхгиганта sgL. В фазе sgL в фильтрах *UBV* был виден только спутник ВЗ V, при этом излучение остатка взрыва сместилось в красную сторону из-за его низкой температуры и проявлялось только в фильтре *R_C* и в более длинноволновых диапазонах. Эта интерпретация кривых блеска подтверждается спектральными наблюдениями (Munari et al. 2007b). Известно, что блеск V838 Моп до вспышки был суммарным блеском двух компонентов, причем после вспышки излучение одного из компонентов в полосах *UBV* оставалось неизменным, а второго — полностью исчезло.

Полное исчезновение взорвавшегося компонента в фильтрах *B* и *V* дает возможность определить его блеск и показатель цвета до вспышки. Для этого нужно из суммарного блеска системы—предшественника вычесть блеск спутника ВЗ V (в линейной шкале интенсивностей). Наши опубликованные ранее измерения суммарного блеска до вспышки такие: $V = 15^m27 \pm 0^m01$ и $B = 15^m87 \pm 0^m03$ (Goranskii and Barsukova

2007, Goranskij et al. 2007). Средневзвешенное значение *V* по 51 снимку АЗТ-5 получается $V = 15^m267 \pm 0^m010$. Мы заново измерили *B*-величины V838 Моп по цифровым обзорам неба и получили $B = 15^m83 \pm 0^m05$ по POSS I и $15^m86 \pm 0^m05$ по UKST. В работе Kimeswenger et al. (2002) по скану SuperCOSMOS пластинки UKST определено значение блеска *B* до вспышки, равное $15^m87 \pm 0^m10$. По 23 московским снимкам средневзвешенное значение $B = 15^m729 \pm 0^m025$, по 96 зоннебергским пластинкам $B = 15^m702 \pm 0^m019$. Эти цифры показывают значительно более яркий блеск. Однако учет вклада двух близких звезд порядка 18^m в бленду дает соответственно $B = 15^m904$ и 15^m872 , что устраняет противоречие между наблюдениями по цифровым обзорам и коллекциям негативов. Так что мы принимаем фотометрические параметры V838 Моп до вспышки $V = 15^m27 \pm 0^m01$ и $B - V = 0^m60 \pm 0^m03$. Спутник ВЗ V, блеск которого доминирует в фазе sgL, имеет величины $V = 16^m21 \pm 0^m01$, $B - V = 0^m58 \pm 0^m03$, и его показатель цвета в пределах ошибок наблюдений не отличим от показателя цвета системы до вспышки. Для взорвавшегося компонента, свет которого исчез после вспышки, получаем

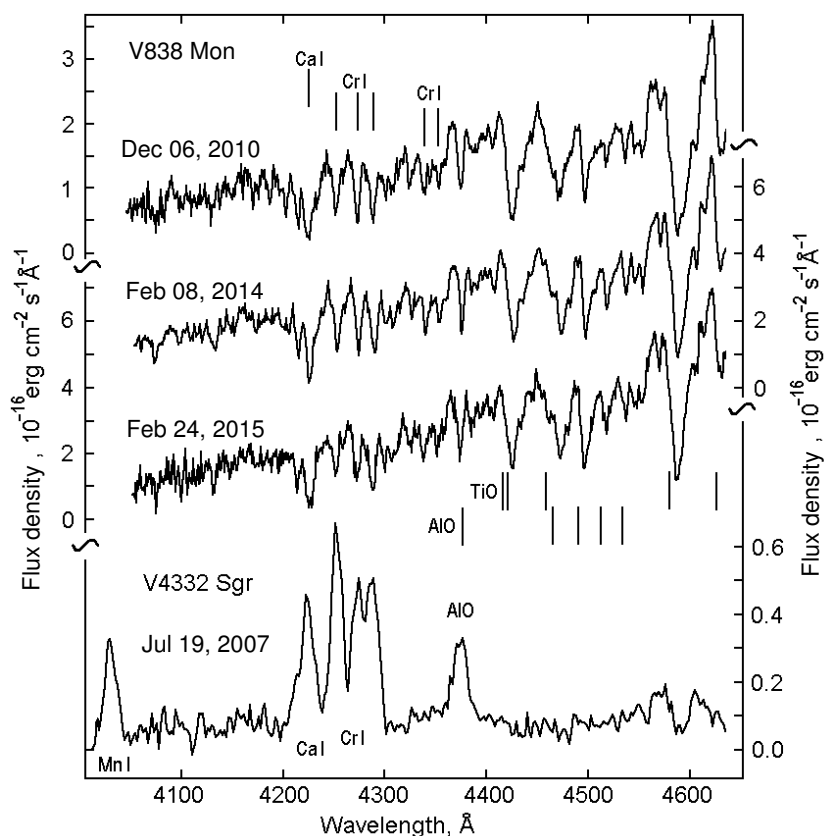


Рис. 7. Оптические спектры БТА/SCORPIO V838 Моп в диапазоне коротких волн (верхние три) в сравнении со спектром V4332 Sgr (внизу).

$V = 15^m86 \pm 0^m02$ и $B - V = 0^m62 \pm 0^m04$. Этот компонент был примерно на 36% ярче, чем спутник V3 V, притом, что по показателю цвета почти от него не отличался.

Величины в фильтрах U , B и V спутника V3 V можно определить еще двумя методами: по свету, потерявшему в затмении в декабре 2006 г., а также по спектрам, в которых виден спутник, путем определения вклада М-сверхгиганта в фотометрические полосы и вычитания этого вклада. Распределения энергии спутника в спектре, определенные этими тремя методами, показаны на рис. 8, и они практически совпадают.

Вычислим абсолютные величины компонентов системы V838 Моп перед вспышкой с учетом избытка цвета $E(B - V) = 0^m85$ (Afşar and Bond 2007, Loebman et al. 2015) и расстояния 6.1 ± 0.6 кпк (Sparks et al. 2008). Для взорвавшегося компонента $M_V = -0^m70 \pm 0^m22$ и для спутника V3 V $M_V = -0^m35 \pm 0^m22$. Боллометрические абсолютные величины с учетом боллометрической поправки для звезд спектрального класса V3 V $BC = -2^m0$ (Nieva and Przybilla 2010) составляют соответственно $M_{bol} = -2^m70 \pm 0^m22$ и $M_{bol} = -2^m35 \pm 0^m22$. Светимость в солнечных

единицах $\lg L/L_\odot$ равна 2.98 для взорвавшегося компонента и 2.83 для его спутника V3 V. Светимость взорвавшегося компонента соответствовала светимости звезды ZAMS V3 V с массой $6 M_\odot$ (в сопоставлении с модельными расчетами Schaller et al. (1992)), причем спутник V3 V расположен даже ниже ZAMS. Этот вывод слабо зависит от ошибок определения расстояния и межзвездного поглощения. По нашим измерениям блеска звезд скопления взорвавшийся компонент класса V3 V до вспышки был на 0^m97 в фильтре V слабее нормальной звезды AV9 класса V3 V скопления Афшара–Бонда, а спутник V3 V — слабее этой звезды на 1^m32 .

Связь системы V838 Моп со скоплением В-звезд Афшара и Бонда подтверждается параллаксами Gaia. В таблице 6 приведены параллаксы и собственные движения звезд скопления из второго выпуска данных Gaia DR2. Параллаксы трех звезд скопления в пределах ошибок их определения соответствуют параллаксу V838 Моп, определенному по поляризации светового эха. (Для V838 Моп в данных DR2 содержится незначимый отрицательный параллакс).

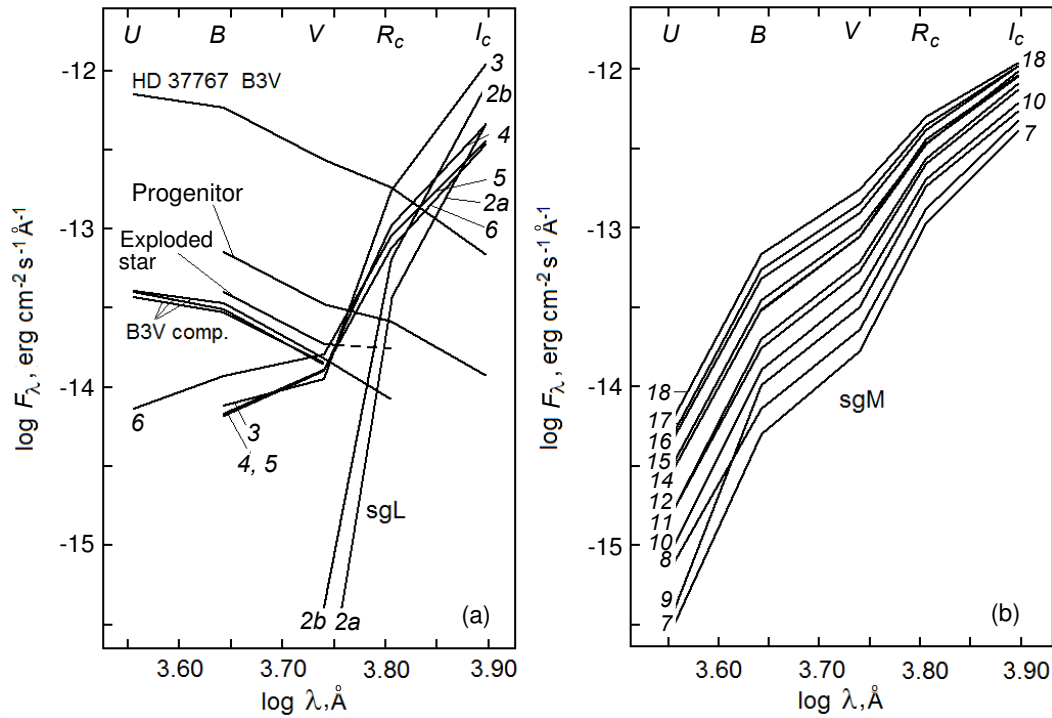


Рис. 8. Распределения энергии в спектре (SED) V838 Mon. (a): SED предшественника — двойной системы звезд типа B3 V (progenitor) и SED отдельных компонентов системы — взорвавшейся звезды (exploded star) и три SED спутника (B3 V comp.), определенные независимо тремя методами. Для сравнения нанесено распределение энергии звезды типа B3 V HD 37767, произвольно смещенное вниз вдоль шкалы $\lg F_{\lambda}$. Здесь же нанесены SED остатка взрыва в стадии коричневого сверхгиганта (sgL) в сезон конца 2002 г. (2a) и начала 2003 г. (2b), а также в стадии M-сверхгиганта в процессе сближения со спутником B3 V с эффектом отражения и при входе спутника в оболочку сверхгиганта (3–5) и с ионизацией внешнего ее слоя (6). (b): эволюция SED M-сверхгиганта (sgM) со спутником B3 V внутри в сезоны 2007–2018 гг. Все SED исправлены за межзвездное покраснение и нанесены на графики в одинаковом масштабе.

Таблица 6. Параллаксы и собственные движения V838 Mon и членов скопления Афшара–Бонда по Gaia DR2

Звезда	π , mas	$\mu(\text{RA})$, mas yr $^{-1}$	$\mu(\text{Decl})$, mas yr $^{-1}$	mag <i>g</i>	mag <i>V</i>
AB 7 (B6 V)	0.206 ± 0.047	-0.376 ± 0.087	$+0.796 \pm 0.075$	15.86	16.085
AB 8 (B4 V)	0.136 ± 0.037	-0.488 ± 0.063	$+0.576 \pm 0.058$	14.92	15.096
AB 9 (B3 V)	0.141 ± 0.033	-0.536 ± 0.059	$+0.396 \pm 0.051$	14.70	14.889
V838 Mon	$0.163 \pm 0.017^*$	-0.535 ± 0.229	$+0.078 \pm 0.174$	11.19	15.267

* Из поляриметрии светового эха (Sparks et al. 2008).

Вопрос о причинах слабого блеска спутника B3 V в системе V838 Mon по отношению к AB 9 и другим звездам скопления специально рассматривался в работе Tylanda and Kamiński (2012). Авторы не смогли найти простой сценарий для его решения. Во всяком случае этой причиной не является неоднородность поглощения в пылевой туманности, окружающей скопление. Однородность поглощения подтверждается также нашими измерениями избытков цвета в системе *UBV* звезд скопления

и V838 Mon. Компоненты системы V838 Mon имеют пониженные светимости в сравнении с нормальной звездой скопления AB 9 того же спектрального класса, вероятно, из-за больших скоростей вращения. Напомним, что высокая скорость вращения спутника B3 V $v \sin i \simeq 250 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$ следует из ширины линий в его спектре (Kamiński et al. 2009). Из-за вращения звезд давление в ядрах звезд и мощность энерговыделения могут быть значительно меньше, чем у нормальных звезд, чем можно

объяснить как относительно низкую светимость, так и отставание в эволюции.

Архивная кривая блеска на рис. 4 в полосе B не обнаруживает постепенного подъема блеска перед вспышкой, который обычно происходит при формировании общей оболочки, по крайней мере, до 1994 г. Из этого следует, что общая оболочка в системе V838 Mon не формировалась ни с компонентом B3 V, ни с каким-либо третьим компонентом, который мог составлять гипотетическую тесную систему со взорвавшейся звездой. Стрелкой на этом рисунке выделены момент и амплитуда ослабления блеска в фильтре R перед вспышкой в 1998 г. (Kimeswenger and Eyres 2006). В это время оболочка взорвавшейся звезды, вероятно, уже находилась в фазе адиабатического расширения.

По 44 снимкам в фильтре V 1976–1977 гг. мы провели поиск периодических орбитальных изменений блеска в системе V838 Mon до взрыва. Диапазон поиска 400^d-0^d10 . Применялся метод преобразования Фурье для дискретных временных рядов (Deeming 1975). Амплитудный спектр V838 Mon до вспышки показан на рис. 9 слева. Для оценки значимости пиков в этом спектре мы анализировали случайные ряды наблюдений методом, предложенным В. Ю. Теребижем (Terebizh 1992). Эти ряды были получены перемешиванием нашего ряда, и обладают теми же свойствами, что и основной ряд: тем же распределением как по временным моментам, так и по звездным величинам. Перемешивание ряда состояло в присвоении каждой дате наблюдения случайно выбранной величины из того же ряда, причем процедура перемешивания выполнялась несколько раз. На графике амплитудного спектра на рис. 9а в процентах (справа) приведена частота встречаемости в случайном спектре значений амплитуды ниже уровня соответствующей горизонтальной линии. Эти расчеты показали, что в спектрах случайных перемешанных рядов встречаются пики с амплитудами периодических компонентов, превышающими амплитуду самого высокого пика основного ряда. Кривая блеска, построенная для самого высокого пика из основного ряда с периодом 0^d207 , показана на рис. 9б. Полуамплитуда гармонической составляющей этого периода составляет 0^m084 , но этот период нельзя считать значимым. С учетом вклада более слабого компонента — спутника B3 V — в суммарный блеск системы этот тест на периодичность исключает полные амплитуды орбитальной переменности взорвавшегося компонента более 0^m3 . Меньшие амплитуды не могут быть обнаружены по фотографическим наблюдениям. Однако заметим, что двойная система типа W UMa не будет выглядеть как переменная звезда, если она наблюдается с оси орбиты.

Итак, новый анализ наших архивных и текущих наблюдений V838 Mon не обнаруживает каких-либо свидетельств слияния компонентов в этой системе, которое могло бы привести к феномену красной новой.

5. ЭВОЛЮЦИЯ ОСТАТКА

Основные стадии эволюции остатка на кривых блеска (рис. 2) и на кривых показателей цвета (рис. 3) отмечены цифрами 1–5. Эволюционирует двойная система, которая состоит из холодного и горячего компонентов, причем вклад каждого компонента в общий блеск системы меняется. Поэтому суммарные цвета системы также показывают значительную переменность, достигающую 3^m в показателе цвета $U - B$ (рис. 3). Максимальная амплитуда в изменениях $U - B$ отражает разность показателей цвета горячей и холодной звезды, которые в разное время были видны в фильтрах U и B в отдельности. Так как мы уже определили величины и показатели цвета спутника B3 V, который не является переменной звездой, мы имеем возможность выделить кривые блеска остатка взорвавшейся звезды в чистом виде, без вклада спутника B3 V (рис. 10). Это холодный сверхгигант с расширяющейся оболочкой, который в конечном счете поглотил спутник.

На рис. 8 мы построили распределения энергии в спектрах (SED) отдельно для спутника (B3 V comp.), суммарного блеска предшественника B3 V (progenitor), для взорвавшейся звезды (exploded star) и холодного остатка взрыва (sgL, sgM). Для сравнения мы приводим SED звезды HD 37767 (B3 V) по данным из работы Jacoby et al. (1984), смещенное произвольно вдоль оси $\lg F(\lambda)$ вниз. Все SED исправлены за межзвездное поглощение, закон межзвездного поглощения взят из исследования Savage and Mathis (1979). На рис. 8а видно, что SED в фильтрах UBV спутника B3 V не отличается от SED звезды сравнения HD 37767. В фильтрах B и V наклон суммарного спектра системы и каждого компонента в отдельности совпадает с наклоном спектра звезды сравнения HD 37767 (B3 V). Однако есть проблема с потоком излучения предшественника в фильтре R , который основан на фотографиях цифровых обзоров неба. По измерениям Munari et al. (2002a) средняя величина $R_C = 15^m33$, у Kimeswenger et al. (2002) по тем же снимкам $R = 14^m59 \pm 0^m10$. Это огромное различие, при том, что разностные оценки блеска взорвавшегося компонента сильно зависят от измерений суммарного блеска. На рис. 8 для построения распределения энергии предшественника и отдельно взорвавшегося компонента мы использовали наиболее близкие данные Kimeswenger et al. (2002). Результат показан штриховой линией.

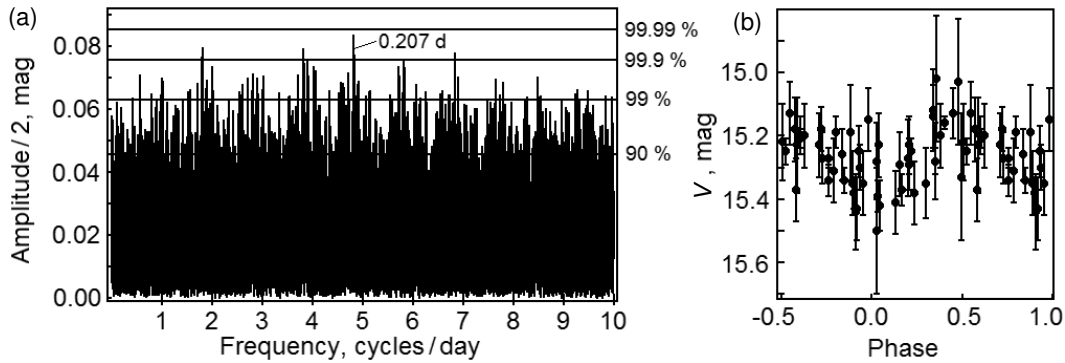


Рис. 9. Результаты частотного анализа фотографических наблюдений предшественника V838 Моп в полосе V по 44 пластинкам 1976–1977 гг. (a) — амплитудный спектр в зависимости от частоты (циклы в день). В процентах справа приведена частота встречаемости пиков в случайном спектре с амплитудой ниже уровня соответствующей горизонтальной линии. (b) — кривая блеска, построенная с периодом 0.207^d , соответствующим самому высокому пику в спектре V838 Моп.

Для холодного остатка взрыва на рис. 8 приведены усредненные за каждый наблюдательный сезон SED, причем каждое SED отмечено числом, соответствующим двум последним цифрам года начала каждого сезона. Сезон 2002 г., когда звезда находилась в стадии sgL, разделен на этом рисунке на две части: конец 2002 г. (2a) и начало 2003 г. (2b).

На графиках кривых блеска и показателей цвета (рис. 2, 3, 10) стадия sgL отмечена цифрой 1. В 2002–2003 гг. остаток взрыва достиг максимальной яркости в ИК-лучах, в то время как в UBV -фильтрах и в спектре вклад остатка был не заметен. В 2003–2006 гг. происходило ослабление блеска в фильтрах V и R , после которого уже в стадии M -сверхгиганта (sgM) блеск стал снова медленно возрастать. В фильтре I он достиг уровня sgL только в 2018 г. Остаток взрыва оказался холодной кислородной звездой. В нашей работе Goranskii and Barsukova (2007) предполагалось, что светимость остатка в фазе sgL, наступившей после окончания вспышки и после потери оболочкой энергии взрыва, определяется энергией химических реакций соединения водорода, углерода и металлов с кислородом, что в обиходе называется «пожаром». После фазы sgL в 2003–2005 гг. происходят сильные изменения SED (рис. 8a, SED 3–5). При ослаблении в длинноволновом диапазоне появляется избыток излучения в фильтре B , притом, что остаток еще очень слаб в фильтре U (стадия 2 на рис. 2). Мы объясняем этот избыток как отраженный свет от спутника ВЗ V на пыли, образовавшейся на поверхности расширяющегося остатка. В стадии sgL никаких следов от спутника в полосе B после вычитания его SED не заметно (рис. 8a, SED 2a, 2b). Вероятно, свет звезды ВЗ V тогда исчезал в глубине sgL. Но в конце

стадии sgL альbedo поверхности расширяющегося сверхгиганта увеличилось, и появился избыток излучения в фильтре B , из чего следует, что пыль была светлая. В 2006 г. интенсивность излучения в фильтрах UBV заметно возрастала (рис. 2, рис. 8, SED 6). Причем, в декабре 2005 г. мы зарегистрировали спектр с эмиссионными линиями $[Fe II]$ при ионизации вещества остатка взрыва на переднем фронте расширяющейся оболочки спутником ВЗ V.

Следующее событие 3 конца 2006 г. (рис. 2 и 3) — ослабление блеска спутника ВЗ V (Goranskij 2006) или «затмение», которое продолжалось порядка 70^d и было детально исследовано Munari et al. (2007a). Глубина затмения в фильтрах $UBVR_C$ соответственно была 1^{m6} , 1^{m2} , 0^{m68} , 0^{m15} , в фильтре I_C блеск в глубокой фазе затмения даже увеличился. Форма затмения на кривых блеска выглядит симметричной (хотя на нисходящей ветви наблюдений недостаточно) с серединой около JD 2454082. Спектроскопия в затмении (Munari et al. 2007a) показала, что спектр спутника ВЗ V на некоторое время полностью исчез из суммарного спектра, притом, что затмение происходило на фоне усиления эмиссионного спектра в линиях Fe II, $[Fe II]$ и в линиях водорода. В работе Munari et al. (2007a) предполагалось, что это было касательное (grazing) затмение и/или перекрытие пылевым облаком. Поскольку сила эмиссий при затмении почти не изменилась, можно предполагать, что спутник ВЗ V был экранирован в основном для земного наблюдателя, в других направлениях спутник ВЗ V без препятствий ионизовал окружающую среду.

Как видно на рис. 2 и 3, в последующие 80 дней после события 3 и до конца наблюдательного сезона 2007 г. (JD 2454195) блеск спутника восстановился полностью, так же, как и эмиссионный

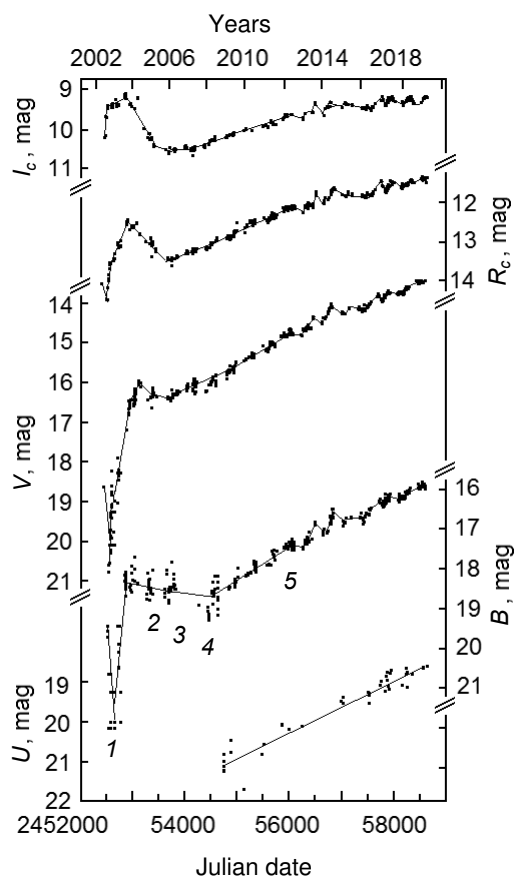


Рис. 10. Кривые блеска холодного сверхгиганта — остатка взрыва красной новой V838 Моп — за вычетом голубого компонента — спутника V3 V — фильтрах системы $UBV(RI)_C$ (снизу вверх). Цифрами под кривой блеска B отмечены основные стадии эволюции остатка, те же, что и на рис. 2. В фазах 2, 3 в фильтре B над трендом поярчания заметен отраженный свет спутника V3 V, хотя вклад самого спутника вычтен. В фильтре U в фазах 1–3 наблюдался только свет спутника V3 V; свет холодного сверхгиганта в этих фазах не регистрировался.

спектр (рис. 5, спектр от 15 февраля 2007 г.). Однако в начале следующего наблюдательного сезона 2007 г. (JD 2454362) блеск спутника снова резко ослабел, и к тому же значительно уменьшилась интенсивность эмиссионного спектра (событие 4, рис. 2). Это ослабление наблюдалось до окончания сезона 2008 г. (JD 2454567) и продолжалось не менее 200 дней. Амплитуда ослабления осенью 2007 г. составила в полосах системы $UBVR_C$ соответственно 2^m0 , 1^m7 , 0^m55 , 0^m05 . В фильтре I_C блеск за это время опять увеличился. В начале нового наблюдательного сезона в 2008 г. (JD 2454766) спутник V3 V полностью исчез во всех фотометрических полосах. Амплитуда второго резкого ослабления блеска, связанная с полным исчезновением спутника V3 V, в полосах UBV была соответственно 3^m3 , 0^m9 , 0^m2 ; в полосах

$(RI)_C$ блеск увеличился. При этом блеск звезды в фильтре U опустился до рекордной величины 21^m . В спектре, полученном 21 февраля 2009 г. (JD 2454884) в коротковолновом диапазоне уже не видно ни следов спутника V3 V, ни эмиссионных линий. В остатке только спектр M-сверхгиганта, который Tylanda et al. (2011b) классифицирован примерно как M6, при том, что молекулярные полосы оказались более глубокими, чем у стандартных звезд подобного спектрального типа. Отсутствие или малая амплитуда скачков блеска в фильтрах $(RI)_C$ объясняются ничтожно малым вкладом спутника V3 V по сравнению с холодным M-сверхгигантом, а также тенденцией постепенно-го увеличения яркости сверхгиганта.

Наши спектральные наблюдения покрывают интервал времени с 2004 г. по 2018 г. (см рис. 3). История сближения спутника V3 V с расширяющейся оболочкой красной новой хорошо прослежена в спектральных наблюдениях в коротковолновом диапазоне $\lambda 4000\text{--}5800 \text{ \AA}$ (рис. 5). Оказывается, слабые запрещенные эмиссионные линии Fe II ионизованного спутником газа появились еще в спектре 18 ноября 2004 г. и усиливались. Максимальной интенсивности эмиссионный спектр достиг в феврале 2007 г., после затмения 2006 г. При этом спектр спутника V3 V был виден полностью. В следующих ниже двух спектрах 2007 г. и 2008 г. (рис. 5) и эмиссионный спектр, и спектр спутника еще видны, но стали значительно слабее. В спектрах 2009 г. и 2010 г. виден только M-сверхгигант с многочисленными молекулярными полосами TiO в абсорбции. Спутник V3 V уже не виден и не ионизует окружающую среду. Все эти события происходят на фоне усиливающегося спектра M-сверхгиганта. В коротковолновом диапазоне в лучших спектрах, полученных на БТА с самым высоким отношением S/N , видны резонансные линии Ca I 4227 \AA , триплет Cr I 4254, 4275, 4290 \AA и молекулярная полоса AlO 4374 \AA в абсорбции. Эти же детали были видны в спектре остатка красной новой V4332 Sgr в эмиссии (рис. 7). Такие спектры характерны для вещества с солнечным содержанием элементов, не прошедшего эволюцию. В случае V838 Моп это фотосферный спектр, а в случае V4332 Sgr — спектр оптически тонкого разреженного облака.

Эволюция остатка красной новой V838 Моп в период с 2004 г. по 2018 г. в длинноволновом диапазоне оптического спектра $\lambda 5620\text{--}7140 \text{ \AA}$ показана на рис. 6. В спектрах 2004 г. и 2005 г. еще виден континуум спутника V3 V с линиями Na I 5889–5896 \AA . С 2010 г. наблюдается спектр

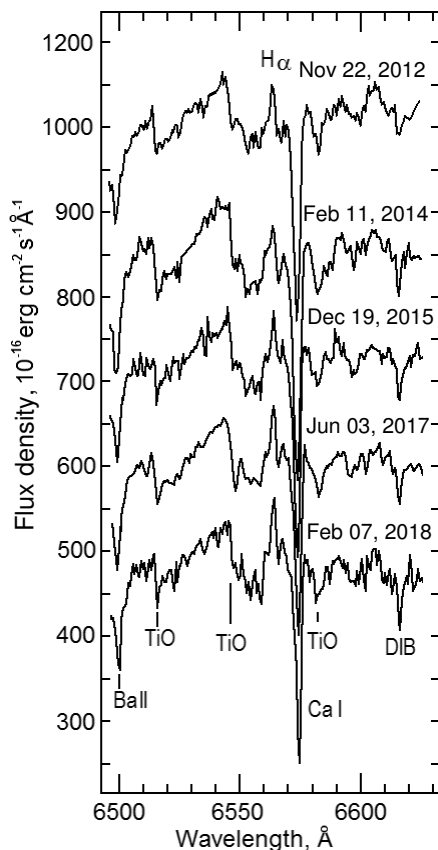


Рис. 11. Постепенное усиление интенсивности эмиссии $H\alpha$ в спектре V838 Mon в период между 2012 г. и 2018 г.

M-сверхгиганта с глубокими молекулярными полосами TiO нарастающей интенсивности, который повторяется из года в год в мелких деталях. Мы надежно отождествили только две атомарные абсорбционные линии: Ba II 6497 Å и Ca I 6572 Å. Эмиссионные линии Fe II в этом диапазоне в наших спектрах не видны, так как здесь доминирует излучение M-сверхгиганта. Однако слабая линия $H\alpha$ видна в эмиссии в наших спектрах начиная с 2012 г. и ее интенсивность постепенно увеличивается (рис. 11). В работе Loebman et al. (2015) эмиссия $H\alpha$ наблюдалась и ранее в спектрах высокого разрешения ($R \sim 31\,500$) в период с октября 2008 г. по сентябрь 2012 г.

Описанные здесь наблюдения взаимодействия спутника V3 V с расширяющейся оболочкой красной новой содержат полезную информацию о строении оболочки. Ее структура оказалась просканированной горячим спутником V3 V, диаметр которого значительно меньше диаметра M-сверхгиганта. При сближении спутника с поверхностью холодного M-сверхгиганта появился эффект отражения. Затем в окрестностях спутника

V3 V молекулярный и атомарный газ был разогрет и ионизован. В полость Роша спутника хлынул холодный материал при вхождении его в плотные верхние слои оболочки. Возможно, он образовал толстый аккреционный диск (Goranskij et al. 2008), который временно перекрыл луч зрения в направлении земного наблюдателя. Однако скоро этот диск был разогрет горячей звездой, частично был ею поглощен, а его остаток ионизован и стал оптически тонким. (Гипотеза формирования временного аккреционного диска вокруг спутника V3 V подвергалась сомнению в статье Tylanda et al. (2009), так как угловой момент, переносимый падающим веществом, в этом случае незначителен. Однако он в большой степени зависит от эксцентриситета орбиты и может быть значительным в периастре). Остается также вероятность того, что произошло затмение горячей звезды плотным облаком, которое образовалось в результате оттекания горячей звезды падающим холодным газом и «фокусировки» газа гравитационным полем этой звезды на луче зрения земного наблюдателя, после чего звезда появилась из-за этого облака. Здесь важно то, что приток материала из оболочки в полость Роша горячей звезды быстро закончился, так как передняя (фронтальная) часть оболочки оказалась относительно тонким слоем, под которым была пустота. Эта пустота была предсказана на основе ИК-наблюдений в диапазоне $\lambda 0.8\text{--}14\ \mu\text{m}$ Lynch et al. (2004).

Анализ наших наблюдений показывает, что не спутник погрузился в оболочку сверхгиганта, опускаясь по эллиптической орбите, а расширяющаяся оболочка его накрыла на орбите. Поскольку во фронтальной части расширяющейся оболочки слой относительно тонкий, в нем образовалось широкое отверстие. Часть вещества этого слоя, оказавшаяся в полости Роша спутника, упала в окрестности спутника. Из этого вещества мог сформироваться либо гипотетический диск, либо плотное облако на луче зрения, из-за чего произошло затмение спутника. Именно в этом отверстии мы наблюдали спутник V3 V в течение 80 дней после затмения фактически без поглощения, после того, как диск или плотное облако на луче зрения были испарены и ионизованы этим спутником до оптически тонкого состояния. Ведь за слоем спутник оказался в пустоте. Очевидно, эта пустота заполнена газом значительно более низкой плотности, чем поверхностный слой, под которым оказался спутник V3 V впоследствии.

По фотометрическим и спектральным данным мы оценили величину поглощения спутника V3 V этим фронтальным слоем (учитывая излучение окружающего газа в эмиссии) в две даты, в которые были получены спектры. 18 ноября 2007 г. в фильтрах $UBVR_C$ интенсивность света

звезды уменьшилась соответственно в 6.2, 3.8, 4.0 и 5.5 раза, 6 февраля 2008 г. в фильтрах UBV — соответственно в 4.4, 3.2, 2.7 раза. Отсюда следует, что при движении спутника $V3V$ внутри оболочки под верхним поглощающим слоем величина поглощения звезды не оставалась постоянной, как следовало ожидать при наличии пустого пространства под этим слоем, а даже уменьшалась. Объяснить это можно расширением самого M -сверхгиганта, в результате чего плотность его внешнего фронтального слоя над спутником постепенно уменьшалась, так что этот слой становился все более прозрачным.

Наличие этого фронтального слоя явно определяет спектральные особенности остатка взрыва V838 Mon, которые отличают его от обычных сверхгигантов класса M и затрудняют спектральную классификацию. Возможно, с фронтальным слоем связана необычно большая глубина поглощения в молекулярных полосах. В наиболее сильных полосах TiO поглощение было полным, так что спектр спутника $V3V$ в глубине этих полос был виден без искажения. Наиболее вероятно, что этот слой был сброшен при выходе крутой ударной волны на поверхность оболочки при вспышке 2002 г. Кривая блеска вспышки V838 Mon в 2002 г. (см., например, Goranskii et al. (2002), Henden (2007)) состояла из трех пиков с максимумами около JD 2452287, 2452311, 2452343, после чего последовал слабый горб около 2452367. Второму пику предшествовал крутой подъем блеска в полосе V на 2^m7 за сутки, который начался в JD 2452307. В работе Goranskii et al. (2002) эти колебания блеска рассматривались как пульсации оболочки при прохождении полосы неустойчивости. Второй пик сопровождался формированием ударной волны. В спектре БТА/НЭС (R 60 000), полученном 4 февраля 2002 г. (JD 2452310) во втором пике яркости (Kirrer et al. 2004), абсорбционные компоненты в P Cуг-профилях водородных линий и линий металлов распространялись соответственно до скоростей -240 и -388 км с $^{-1}$. Скорости центра sgM в системе V838 Mon определены в локальном стандарте покоя (LSR) по мазерному радиоизлучению оболочки в эмиссии SiO $+53.7$ км с $^{-1}$ (Deguchi et al. 2005) и по радиоизлучению эмиссии CO в окружающем облаке $+53.3$ км с $^{-1}$ (Kamiński et al. 2011). Эта скорость в стандарте LSR соответствует гелиоцентрической лучевой скорости $v_{hel} = +71$ км с $^{-1}$. Это означает, что внешний слой был сорван ударной волной со скоростями в пределах $310-460$ км с $^{-1}$. Так что осенью 2007 г. спутник $V3V$ сначала оказался под внешним слоем оболочки, сброшенной ударной волной, и свет его значительно ослабел. А затем осенью 2008 г. спутник окончательно исчез под

фотосферой холодной звезды, которая находилась под этим внешним слоем и также расширялась, но с меньшей скоростью. Такое строение оболочки объясняет необычно высокие пики излучения в континууме вблизи кантов молекулярных полос в раннем спектре 2004 г., показанном здесь на рис. 5 вверху (бланкетинг-эффект (Goranskii et al. 2002)), и сложную двухкомпонентную структуру абсорбционных линий в спектрах высокого разрешения KECK/HIRES (Kamiński et al. 2009, Tylanda et al. 2011b).

Следующая стадия эволюции остатка взрыва — сверхгигант класса M (sgM) со звездой класса $V3V$ внутри — отмечена на кривых блеска и показателей цвета (рис. 2, 3, 10) номером 5. Основная тенденция на кривых блеска во всех фильтрах системы $UBVR_CI_C$ — постепенное увеличение яркости с замедлением темпа этого увеличения, наиболее четко выраженном в длинноволновых фильтрах. На рис. 10 показаны кривые блеска сверхгиганта sgM с вычетом спектра $V3V$. Видно, что увеличение яркости sgM началось сразу после стадии sgL . Так что сближение со спутником $V3V$ и последующий захват спутника внутрь sgM эту тенденцию не изменили. Это не относится к фильтру B , в котором при сближении и перед затмением остался невычитанным отраженный свет звезды $V3V$. В фильтре U в этот период доминировал свет спутника $V3V$ с небольшим вкладом эмиссионных линий, и потому выделить вклад sgM , который был ничтожно мал, оказалось невозможно. Поэтому кривая блеска sgM в фильтре U на рис. 10 представлена только с 2008 г. В выделенных из суммарного блеска SED M -сверхгиганта на рис. 8b, которые представлены в логарифмической шкале, тенденция увеличения блеска доминирует с сезона 2007 г. по сезон 2018 г. При этом наклон SED постепенно уменьшался, что свидетельствует о постепенном росте температуры. В стадии 5 амплитуда увеличения яркости sgM менялась за последние десять лет в зависимости от длины волны в среднем от 2^m4 в фильтрах U и B до 1^m4 в фильтре I_C . На тренд увеличения яркости накладываются хаотические колебания с амплитудой не выше 0^m4 . В последние пять лет в фильтре I_C рост блеска замедлился, и после этого амплитуда изменений блеска в этом фильтре не превышала 0^m3 . При этом появились квазипериодические колебания с периодом около 320^d , амплитуда которых составляла 0^m15-0^m20 в I_C (рис. 12).

Показатели цвета sgM (кроме $U - B$) медленно эволюционировали в голубую сторону, из чего следует, что температура холодного остатка увеличилась с увеличением его яркости. За десять лет, начиная с конца 2008 г., показатель цвета $B - V$ менялся от 2^m72 до 2^m45 , $V - R_C$ — от 2^m78 до

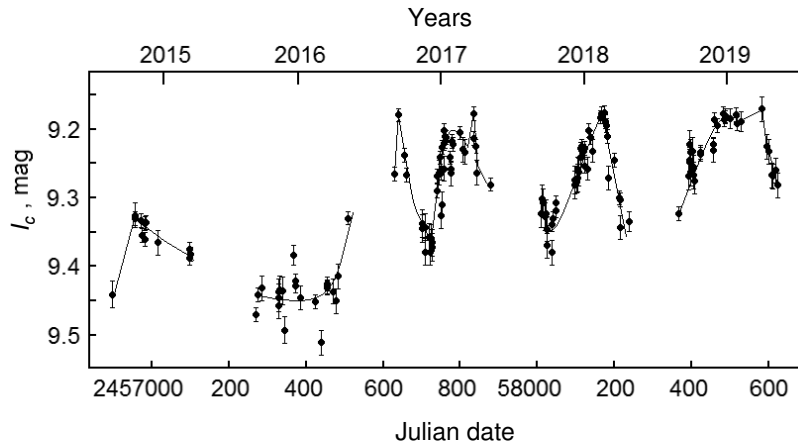


Рис. 12. Фрагмент кривой блеска V838 Моп в фильтре I_C в 2014–2019 гг. В 2017 г. появились квазипериодические колебания блеска с амплитудой 0^m15 и возможным периодом порядка 320 дней.

2^m11 , $R_C - I_C$ — от 2^m72 до 2^m16 . Показатель цвета $U - B$ оставался в основном постоянным на уровне 2^m65 . Эти показатели цвета подвержены межзвездному покраснению. В феврале 2009 г. во время спектральных наблюдений Tylanda et al. (2011b) по оптической и ИК-фотометрии в полосах системы JHK спектр звезды был классифицирован как M6.3. По нашим данным на это время фотометрические параметры sgM были следующие: $V = 15^m64$, $U - B = 2^m6$, $B - V = 2^m71$, $V - R_C = 2^m84$, $V - I_C = 5^m53$. За десять лет показатель цвета $V - I_C$ уменьшился до 4^m22 . В работе Blanco (1964) исследована зависимость этого показателя цвета от спектрального класса для M-гигантов (см. рис. 5 в этой работе). Учет межзвездного покраснения V838 Моп в показателе цвета $V - I_C$ по формуле

$$E(V - I_C) = 1.20 E(B - V) = 1.20 \times 0.85 = 1.02$$

дает пределы для собственного показателя цвета звезды $(V - I_C)_0$ 4^m51 и 3^m20 и диапазон спектральных классов (согласно Blanco (1964)) в два подкласса: M7.5 и M5.5. При этом светимость M-гиганта в фильтре V увеличилась на 2^m5 (примерно в десять раз).

Эти оценки спектрального класса в 2008–2009 гг. не противоречат определению спектрального класса M7, основывающемуся на наклоне SED в оптической области спектра. Однако в ИК-области ($1-5 \mu\text{m}$) спектр коричневого сверхгиганта класса L3 наилучшим образом представляет наклон SED (Loebman et al. 2015).

Для изучения эволюции расширяющейся оболочки мы использовали лучевые скорости, определенные по спектрам низкого и среднего разрешения. Лучевые скорости определялись как по

молекулярным полосам, так и по сильным абсорбционным линиям. Ранее лучевые скорости были исследованы по спектрам высокого разрешения в работах Kamiński et al. (2009), Munari et al. (2007a), Tylanda et al. (2009; 2011b). В исследовании Tylanda et al. (2009) обнаружена сильная зависимость лучевых скоростей в полосах TiO в спектре 2005 г. от потенциала возбуждения (разброс 180 km s^{-1}). По молекулярным полосам, формирующимся на уровнях энергии высокого возбуждения, была определена гелиоцентрическая лучевая скорость звезды $58 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$. В этой же работе по голубому абсорбционному компоненту в профиле линии K I 7698 Å обнаружено истечение со скоростью $V_\infty = 215 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$. Линии Ti I имеют обратные профили P Cyg с красными компонентами в абсорбции, распространяющимися до $50-60 \text{ km s}^{-1}$, что, по мнению авторов, является указанием на выпадение части вещества к центру. В спектре 2009 г. (уже со спутником V3 V внутри) профили атомарных абсорбционных линий стали абсорбционными без компонентов типа P Cyg (Tylanda et al. 2011b). Ширина абсорбционных линий увеличилась, вероятно, за счет исчезновения эмиссии. Абсорбционные линии имеют многокомпонентную структуру, различную у разных атомов. Скорости истечения в 2009 г. остались без изменения, такими же, как в 2005 г., но компоненты в профилях стали менее четко выраженными и выявляются в меньшем числе линий. К сожалению, спектральные наблюдения высокого разрешения не охватывают достаточно большие интервалы времени для того, чтобы проследить изменения лучевой скорости оболочки как целого.

Лучевые скорости в нашей работе были измерены по 12 полосам TiO. Измерялись длины волн середины спада интенсивности в кантах полос. Эта

Таблица 7. Лучевые скорости в абсорбционных линиях Ba II 6497 Å и Ca I 6572 Å км с⁻¹

JD hel.24...	Ba II 6497 Å	σ	Ca I 6572 Å	σ
53054.239	-86	10	-73	20
53386.29	-41	10	-36	10
55536.520	-15	20	-45	20
56254.558	+60	6	+6	10
56343.366	+51	6	+52	10
56700.390	+60	6	+15	10
56967.535	+19	6	-15	20
57053.393	+67	10	+5	14
57376.496	+76	6	+19	6
57421.413	+45	6	+13	6
57474.212	+42	20	+15	10
57790.313	+70	10	+23	6
57818.341	+67	6	+21	6
57819.269	+69	6	+25	6
58083.535	+113	10	+59	16
58157.309	+90	8	+44	8
58408.603	+87	20	+61	10

длина волны наименее зависима от спектрального разрешения. Оказалось, что такие скорости показывают значительные изменения между разными полосами, но систематические изменения со временем для каждой отдельной полосы не были обнаружены. Из абсорбционных линий в наших спектрах наиболее четко видны две: Ba II 6497 Å и Ca I 6572 Å, причем они видны только в спектрах с достаточно высоким спектральным разрешением: 8 Å и выше. Спектров, пригодных для измерения лучевых скоростей в линиях, оказалось всего 17, но зато они относятся к полному интервалу спектральных наблюдений JD 2453054–2458408 (2004–2018 гг.). Поскольку обе эти линии расположены в красном диапазоне, в котором доминирует излучение M-сверхгиганта, то всякие возможные эмиссионные детали, которые могли накладываться на профили этих линий в стадии сближения со спутником V3 V, не могли оказать влияние на измерение скоростей. Точность определения лучевых скоростей 6–20 км с⁻¹. Лучевые скорости представлены в таблице 7 и на графиках в зависимости от времени на рис. 13. Скорости показывают явный

временной тренд в пределах [–80; +70] км с⁻¹ в линии Ba II 6497 Å и [–80; +100] км с⁻¹ в линии Ca I 6572 Å. Учитывая гелиоцентрическую лучевую скорость звезды +71 км с⁻¹, можно сделать вывод, что поглощающий слой, который формирует эти линии, испытывал торможение. В настоящее время (2018–2019 гг.) его расширение остановилось или даже началось падение назад, на центр масс (в линии Ca I 6572 Å). В наших спектрах эти линии имеют симметричные профили. Однако в спектрах высокого разрешения в 2009 г. линия Ca I 6572 Å имела профиль, состоящий из двух компонентов: узкого с центром на –92 км с⁻¹ и широкого с центром на нулевой скорости (Tulenda et al. 2011b). Такие же профили наблюдались в 2008–2012 гг. в спектрах высокого разрешения (Loebman et al. 2015). Пока не ясно, какие компоненты участвуют в тренде торможения. Наши наблюдения по спектрам средней дисперсии подтверждают, что расширяющаяся оболочка M-сверхгиганта настигла на орбите спутник V3 V и накрыла его при скорости расширения порядка 100 км с⁻¹ (см. рис. 13). Это разность скоростей оболочки по абсорбционным линиям в момент поглощения спутника и гелиоцентрической скорости центра звезды, измеренной по мазерному радиоизлучению.

Судя по нашим наблюдениям, дальнейшая эволюция V838 Mon приведет к падению вещества оболочки красной новой на два гравитирующих центра: на звезду V3 V и на центр массы взорвавшейся звезды. Вероятно, в 2018 г. оболочка уже представляла собой вытянутую структуру, и наблюдаемая периодичность блеска в 320 дней связана с орбитальным вращением новой гигантской контактной системы, орбитальный период которой вдвое больше: 640 дней. В конечном счете эта система станет разделенной. Часть вещества сформирует околозвездный диск и затем будет потеряна системой.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ архивной фотометрии предшественника красной новой V838 Mon, а также фотометрии и спектроскопии ее остатка вместе с другими наблюдательными данными дает основания считать, что событие красной новой здесь не связано со слиянием звезд в двойной или кратной системе. В работе Martini et al. (1999) красные новые V4332 Sgr и M 31 RV объяснялись «событием в ядре одиночной проэволюционировавшей звезды, которое вызвало медленный удар (slow shock), распространившийся до фотосферы, ... который выталкивает фотосферу звезды». «Этот сценарий объясняет высокие плотности, малые скорости и временные масштабы, которые наблюдаются». В принципе, феномен

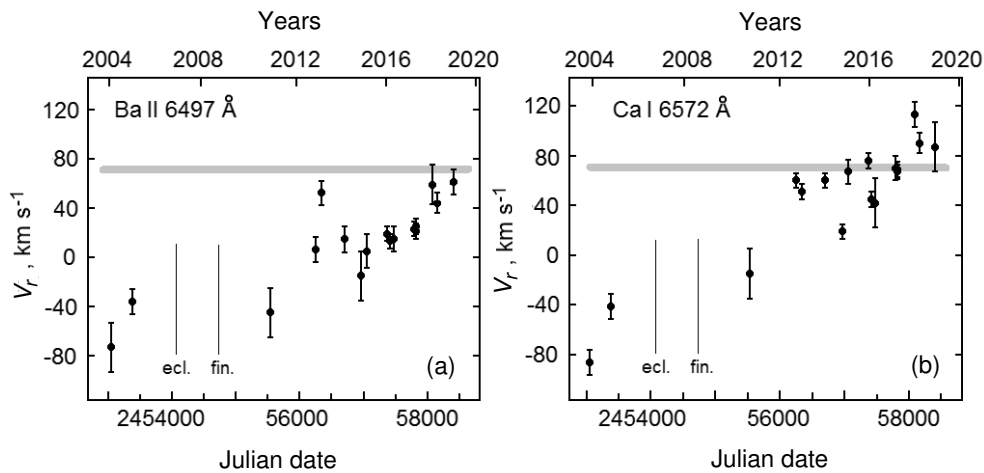


Рис. 13. Лучевые скорости V838 Моп, определенные по абсорбционным линиям, в зависимости от времени. Горизонтальная серая линия — гелиоцентрическая скорость центра М-сверхгиганта по радионаблюдениям мазерного излучения. Тонкими вертикальными линиями показаны: ecl. — момент середины затмения спутника В3 V; fin. — первый момент наблюдения окончательного поглощения спутника М-сверхгигантом. Тенденция приближения наблюдаемых скоростей к серой линии из области отрицательных скоростей означает торможение оболочки. Пересечение этой линии и смещение в сторону положительных скоростей означает остановку расширения оболочки и, возможно, даже начало ее падения на центр тяжести. Графики демонстрируют, что поглощение спутника М-сверхгигантом произошло при скорости расширения оболочки порядка 100 km s^{-1} .

красной новой — это реакция массивной оболочки звезды на энергетический толчок или удар из центра по ее основанию. Причиной такого толчка может оказаться слияние ядер звезд внутри общей оболочки. Следует ожидать всплеска энерговыделения из образовавшегося при слиянии нового ядра, так как давление, плотность вещества и температура в ядре резко увеличиваются. К тому же перед слиянием ядер звезд при формировании общей оболочки высвобождается энергия аккреции большой массы в полость Роша одной из звезд, из-за чего звезда постепенно увеличивает яркость перед вспышкой. Для событий V4332 Sgr и V130 Sco есть наблюдательные основания связывать красные новые со слиянием компонентов в двойных системах. V838 Моп не является ни одиночной, ни проэволюционировавшей звездой. Это молодая система, широкая пара, но событие красной новой произошло у одного из ее компонентов. Вспышке V838 Моп не предшествовало постепенное увеличение яркости звезды. То есть общая оболочка не формировалась. Только через шесть лет после вспышки красной новой второй компонент пары был поглощен расширяющейся оболочкой остатка взрыва первого компонента. Однако слияние этой пары еще не произошло. Вопрос о том, что произошло в центре одной из звезд пары при вспышке красной новой, пока остается нерешенным.

Открытие холодных взрывов оказалось неожиданным сюрпризом в астрофизике XX века, хотя «горячие» взрывы давно известны. Феномен красной новой не был предсказан в модельных

расчетах. Горячие взрывы — это классические новые, катаклизмические переменные звезды разных типов, сверхновые. В катаклизмических карликовых системах вспышки происходят в нестабильных аккреционных дисках. Классические новые, как известно, вспыхивают при термоядерном взрыве водорода, который накопился в тонком слое на поверхности белого карлика в результате аккреции со спутника — красного карлика. Масса водорода в таком слое $1/100$ – $1/10000$ массы белого карлика. Сверхновые I типа, SN I, наиболее часто встречающиеся сверхновые — это термоядерный взрыв выродившегося белого карлика. Но белые карлики не имеют массивных оболочек, и потому их взрывы не приводят к феномену красных новых. Сверхновые II типа, SN II, иногда имеют массивные оболочки, которые сбрасываются при коллапсе ядра с большими скоростями в десятки тысяч km s^{-1} . У некоторых SN II встречаются кривые блеска, похожие на кривые блеска массивных красных новых. В их кривых блеска виден первый голубой или УФ-пик (initial flash) при выходе на поверхность ударной волны, а затем происходит покраснение показателей цвета, и виден вторичный красный максимум. К SN II 1987A/LMC, упоминавшейся ранее, можно добавить SN IIb 2011dh/M 51 (Marion et al. 2014, Tsvetkov et al. 2012), SN II 1993J/M 81 (Benson et al. 1994). В большинстве случаев первый голубой пик у SN II не наблюдается из-за позднего открытия и короткой продолжительности. (В работе Prieto et al. (2017) голубой пик не наблюдался

у SN IIp 2017hss). Спектры и кривые блеска на спаде после вспышки показывают значительные отличия SN II от массивных красных новых, так как сброшенные оболочки переходят в оптически тонкую фазу. Эти отличия объясняются высокими температурами и большими скоростями сбрасываемых оболочек у сверхновых из-за мощного энерговыделения при этих взрывах.

Одна из гипотез (гипотеза 1), которую мы предлагали для объяснения взрыва в центре молодой звезды, подобной предшественнику V838 Mon, — термоядерный взрыв водорода в ядре звезды в конце стадии гравитационного сжатия. Однако эта гипотеза подвергается сомнению в рамках современной теории эволюции. «Воспламенение водорода — спокойный процесс, и он происходит задолго до главной последовательности нулевого возраста», — утверждал Питер Эггльтон в дискуссии на симпозиуме «Stellar Mergers» (Лейден, Нидерланды, 2009). Взрывы в ядрах протозвезд в конце стадии гравитационного сжатия, когда водородное ядро полностью ионизовано, были предсказаны еще основоположниками эволюционной теории протозвезд Hayashi and Nakano (1965). В моделях с массой $5 M_{\odot}$ (Iben 1965) протозвезда в стадии гравитационного сжатия довольно быстро, за 50 тыс. лет, проходит финальную часть своего эволюционного трека через пробел Герцшпрунга в район ZAMS на диаграмме температура—светимость. При этом звезда остается в стадии гравитационного сжатия до тех пор, пока в результате реакции горения углерода $C^{12}(p, \gamma)$ его содержание не опустится до равновесного, при котором реакции протон-протонного и C—N-циклов заменят гравитационное сжатие. По этим расчетам, реакции горения водорода включаются в районе главной последовательности. Согласно Iben (1965), процесс перехода от гравитационного сжатия к ядерному горению становится все более плавным (smooth) с увеличением массы протозвезды.

В случае классических новых воспламенение водорода на поверхности белых карликов при всех похожих условиях выглядит катастрофическим. Поскольку модели звезд при расчетах звездной эволюции являются равновесными и статическими, они могут не отражать динамические изменения.

Известны мощные вспышки молодых звезд типа T Tau, такие, как объекты типа FU Ori. Это маломассивные звезды типа Солнца или с меньшими массами. Общепринятой гипотезой о природе этих вспышек в настоящее время является резкое увеличение темпа аккреции из околос звездного диска на молодую вращающуюся звезду, вследствие чего ее температура и светимость возрастают, а радиус увеличивается вдвое (Popham et al. 1996).

Темп аккреции увеличивается на несколько порядков величины в сравнении со спокойным состоянием. При этом аккреционный диск оказывается основным источником излучения во вспышке.

Представления о молодости системы V838 Mon основаны на следующих фактах: связь с молодым скоплением В-звезд и массивным пылевым облаком, литий в спектрах, положение взорвавшегося компонента на ZAMS диаграммы температура—светимость с массой $6 M_{\odot}$, быстрое вращение спутника (которое не было потеряно после гравитационного сжатия). В окрестностях звезд, испытывавших вспышки типа FU Ori, обычно находят следы звездообразования: газо-пылевые туманности и маломассивные переменные звезды типа T Tau. В молодых звездных скоплениях и ассоциациях, содержащих OB-звезды, возраст протозвезд малой массы превышает возраст массивных протозвезд, что связано с условиями фрагментации газопылевого облака на ранних стадиях (Shklovskij 1984). То есть сначала образуются маломассивные звезды. В таком случае остается загадкой отсутствие маломассивных звезд в скоплении Афшара—Бонда.

В случае V838 Mon близкие окрестности были освещены вспышкой, и пылевая составляющая была видна в световом эхе. На снимке, полученном 30 апреля 2002 г. на космическом телескопе Хаббл (HST) (см., например, Bond et al. (2003)), в центре эха вокруг звезды видна пустота диаметром примерно $6''$, а на большем удалении — концентрические дуги вокруг центральной звезды. В рамках модели эха как светового эллипсоида с фокусами в точках вспышки и наблюдателя можно сделать вывод о том, что в эту дату световое эхо произошло от пылевой туманности, которая расположена на луче зрения прямо перед звездой. Звезда оказалась в пустом пространстве за дальней границей туманности на расстоянии 0.04 пк от границы. По другим, более поздним снимкам светового эха можно установить, что эта пустота распространяется вдоль луча зрения по крайней мере до 0.16 пк за звездой. Концентрические дуги объяснить просто. Это сечения неоднородностей пылевого облака узким световым эллипсоидом, которые наблюдаются под малым углом к лучу зрения. Этот снимок HST показывает, что система хотя и расположена близко к границе пылевого облака, но уже потеряла связь с ним, и в близких окрестностях нет никаких следов рассеивающего свет материала, который до вспышки 2002 г. мог либо падать на нее, либо, наоборот, из нее извергаться. Если и существовали какие-то остатки газо-пылевого кокона вокруг этой системы протозвезд после стадии гравитационного сжатия, то они уже давно вытеснены излучением пары горячих звезд из окрестностей системы, так что не осталось

следов вытесненного вещества на снимках светового эха. Взрыв компонента системы V838 Моп явно имеет другую природу, отличающуюся от объектов типа FU Ori.

Еще одна гипотеза (гипотеза 2) для объяснения феномена красной новой у молодой звезды — быстрое вращение протозвезды в стадии гравитационного сжатия. Быстрое вращение спутника V3 V — установленный факт. Как взорвавшаяся звезда, так и ее спутник являются звездами пониженной светимости при сравнении с нормальными звездами скопления. Было бы естественно объяснять быстрым вращением и пониженную светимость, и отставание в эволюции от нормальных звезд. В таком случае, используя эволюционные треки на диаграмме температура—светимость, рассчитанные без учета вращения, при определении массы звезды мы могли ее недооценить. К тому же известно, что при гравитационном сжатии центробежные силы нарастают и даже могут превзойти силы притяжения. При большом вращательном моменте центробежные силы могут остановить сжатие звезды в направлении, перпендикулярном оси вращения. Это может привести к фрагментации звезды, к формированию двойной системы или одиночной звезды с планетной системой (Ruzmaikina 1986). Можно предположить, что в результате гравитационного сжатия может получиться быстро вращающаяся звезда с раздвоенным ядром и единой оболочкой, которая будет выглядеть как одиночная звезда, расположенная вблизи ZAMS. Дефрагментация (слияние ядер) наступит через длительный период времени в результате потери вращательного момента и закончится вспышкой красной новой. Потеря вращательного момента в такой звезде может происходить или под влиянием близкого компонента, или при потере массы в околозвездный диск, или под действием магнитного поля.

Обе гипотезы могут оказаться верными, если они описывают единый процесс, в котором при дефрагментации образуется массивное ядро, и в этом ядре происходит вспышка термоядерного горения водорода.

В новом исследовании массивных красных новых (Pastorello et al. 2019) обсуждаются некоторые альтернативные сценарии красных новых, в том числе и объектов малой массы. Сценарий для двойных систем «со сбросом общей оболочки и, возможно, окончательным слиянием» считается здесь предпочтительным, но и варианты «с серьезными нестабильностями у одиночных звезд тоже исключить нельзя». В этой работе предлагается разделение красных новых на объекты низкой светимости (RN) и высокой светимости (LRN), хотя обнаружен непрерывный переход и корреляции таких свойств как абсолютные величины предшественников, а

также абсолютные величины, достигнутые в предвспышках, в синем и красном пиках вспышек. Для звезд промежуточной массы предлагается сценарий красной новой (RN) как одиночной звезды в стадии AGB с формированием в результате звездного объекта, окруженного плотной пылевой околозвездной средой. Такие вспышки имеют кривые блеска с двумя пиками. Сценарии светимых красных новых (LRN) — массивных одиночных звезд и двойных систем — кончаются взрывом сверхновой звезды. Для массивной системы процесс слияния может быть прерван сверхновой как на стадии формирования общей оболочки еще до окончательного слияния ядер звезд (сценарий 1), так и после окончательного слияния в стадии эволюции его остатка (сценарий 2). В этой работе в качестве образца сценария 2 представлено исследование события SN 2011ht в галактике UGC 4560, в котором вспышка SN IIp началась примерно через 300 дней после максимума вспышки LRN. Причем первый спектр, полученный на восходящей ветви SN, оказался типичным спектром холодного взрыва красной новой. Образцом сценария 1 является событие «несостоявшейся» красной новой SN IIL 2015bh в галактике NGC 2770, исследованное нами (Goranskij et al. 2016b). В этой системе при формировании общей оболочки, а также при взрыве SN спектр звезды напоминал спектры классической новой класса Fe II. Как и у новых этого класса, спектр формировался относительно холодным газом со спутника, который падал в полость Роша массивной звезды LBV в динамическом режиме аккреции, что привело к коллапсу ядра LBV. При взрыве SN общая оболочка была сброшена, и эволюция остатка взрыва через коричневый L-сверхгигант, а затем M-сверхгигант, не состоялась. В работе Pastorello et al. (2019) также рассматривается сценарий LRN для одиночных желтых массивных гипергигантов (YHG), которые, проходя через стадию истечения вещества, формирования околозвездной среды, после вспышки, характерной для звезд LBV, взрываются как сверхновые.

7. ВЫВОДЫ

Предшественником красной новой 2002 г. V838 Моп является широкая пара звезд спектрального класса V3 V, одна из которых, более яркая, взорвалась. Звезды этой пары имели пониженную светимость, а взорвавшаяся звезда была расположена на главной последовательности нулевого возраста диаграммы спектр—светимость. Так что система V838 Моп находится в ранней стадии эволюции. Масса взорвавшейся звезды примерно $6\text{--}8 M_{\odot}$.

Остатком взрыва является холодный сверхгигант кислородного типа с расширяющейся оболочкой. В его спектре наблюдаются молекулярные полосы и линии атомов в абсорбции. По лучевым скоростям в линиях металлов установлено, что его оболочка испытывает торможение. Возможно, в конце 2018 г. расширение оболочки закончилось. Спутник V3 V был поглощен расширяющейся оболочкой в 2008 г., но перед поглощением он просканировал ее внешнюю структуру. Под верхним относительно тонким внешним слоем оболочки обнаружилась пустота, в которой спутник двигался около 200 дней. Наличие внешнего слоя и пустоты под ним мы связываем с отрывом слоя при выходе крутой ударной волны в пике вспышки в начале февраля 2002 г. При погружении во внешний слой спутник сначала исчез из суммарного спектра (затмение), но затем появился на короткое время. Его излучение было поглощено внешним слоем и ослабло в 3–6 раз (в зависимости от длины волны). Осенью 2008 г. оболочка окончательно поглотила спутник, который исчез под внутренней фотосферой и до сих пор (начало 2019 г.) остается внутри нее.

Сближение спутника V3 V с расширяющейся холодной звездой и погружение внутрь нее сопровождалось ионизацией вещества и появлением сильного эмиссионного спектра, в котором доминировали линии ионов Fe II и [Fe II], появились бальмеровские эмиссии. Эмиссионный спектр окончательно исчез осенью 2008 г., когда спутник V3 V оказался внутри холодной звезды. Очень слабую эмиссию H α с медленным усилением интенсивности мы наблюдаем с 2012 г.

В период с конца 2002 г. до середины 2003 г. остаток взрыва имел спектр коричневого сверхгиганта sgL. Затем его оптический спектр быстро сменился на спектр, похожий на sgM. При переходе от стадии sgL к sgM в распределении энергии наблюдался сильный избыток излучения в синем диапазоне — эффект отражения звезды V3 V на поверхности sgM. Вероятно, это связано с образованием пылевых частиц и увеличением альбедо поверхности sgM. В период с 2004 г. по 2018 г. яркость sgM постепенно увеличивалась и температура медленно повышалась. Причем темп этих изменений не зависел от того, где находится спутник V3 V: снаружи или внутри M-звезды.

Мы не обнаружили никаких свидетельств того, что взорвавшийся компонент V838 Mon был двойной системой и что слияние компонентов могло быть причиной красной новой. Мы пришли к выводу, что феномен красной новой есть просто реакция массивной оболочки звезды на толчок из центра, вызванный скачком энерговыделения в ядре звезды.

Мы предлагаем две гипотезы для объяснения холодного взрыва одного из компонентов в системе V838 Mon: (1) термоядерный взрыв водорода в конце стадии гравитационного сжатия протозвезды, достигшей главной последовательности нулевого возраста; (2) фрагментация ядра быстро вращающейся протозвезды в стадии гравитационного сжатия и слияние фрагментов после потери вращательного момента. Для подтверждения или опровержения таких гипотез требуются динамические модельные расчеты.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе были использованы базы данных Gaia DR2, DSS и SuperCOSMOS. Мы благодарим Комитет по тематике больших телескопов за предоставление наблюдательного времени на БТА, а также администрацию САО РАН за наблюдательное время на телескопе Цейсс-1000.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

В.П.Г., Е.А.Б. и А.Ф.В. благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку настоящей работы грантом 14–02–00759. А.В.Ж. благодарит РФФИ за поддержку грантом 16–02–0758. Эта работа была также поддержана грантом Академии наук Словакии VEGA № 2/0008/17 и Агентством исследований и развития Словакии (контракт № APVV-15-0458). Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005).
2. M. Afşar and H. E. Bond, *Astron. J.* **133** (2), 387 (2007).
3. E. Barsukova, V. Goranskij, P. Abolmasov, and S. Fabrika, *Astronomer's Telegram*, № 803, 1 (2006).
4. E. A. Barsukova, V. P. Goranskij, and A. F. Valeev, *ASP Conf. Ser.* **510**, 401 (2017).
5. E. A. Barsukova, V. P. Goranskij, A. F. Valeev, and A. V. Zharova, *Astrophysical Bulletin* **69** (1), 67 (2014).
6. J. Bedient, *IAU Circ.*, № 7790, 2 (2002).

7. P. J. Benson, W. Herbst, J. J. Salzer, et al., *Astron. J.* **107**, 1453 (1994).
8. V. M. Blanco, *Astron. J.* **69**, 730 (1964).
9. H. E. Bond, *Astronomer's Telegram*, № 966, 1 (2006).
10. H. E. Bond, A. Henden, Z. G. Levay, et al., *Nature* **422** (6930), 405 (2003).
11. H. E. Bond, A. Henden, Z. G. Levay, et al., *ASP Conf. Ser.* **313**, 543 (2004).
12. N. J. Brown, E. O. Waagen, C. Scovil, et al., *IAU Circ.*, № 7785, 1 (2002).
13. R. M. Catchpole, *Highlights of Astronomy* **8**, 185 (1989).
14. L. A. Crause, W. A. Lawson, D. Kilkenny, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **341** (3), 785 (2003).
15. L. A. Crause, W. A. Lawson, J. W. Menzies, and F. Marang, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **358** (4), 1352 (2005).
16. T. J. Deeming, *Astrophys. and Space Sci.* **36** (1), 137 (1975).
17. S. Deguchi, N. Matsunaga, and H. Fukushi, *Publ. Astron. Soc. Japan* **57**, L25 (2005).
18. A. Evans, T. R. Geballe, M. T. Rushton, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **343** (3), 1054 (2003).
19. V. P. Goranskii and E. A. Barsukova, *Astronomy Reports* **51** (2), 126 (2007).
20. V. P. Goranskii, A. V. Kusakina, N. V. Metlova, et al., *Astronomy Letters* **28**, 691 (2002).
21. V. Goranskij, *Astronomer's Telegram*, № 964, 1 (2006).
22. V. Goranskij, A. Zharova, E. Barsukova, et al., arXiv e-prints arXiv:0810.1887 (2008).
23. V. P. Goranskij and E. A. Barsukova, *Astronomer's Telegram*, № 1821, 1 (2008).
24. V. P. Goranskij, E. A. Barsukova, O. I. Spiridonova, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (1), 82 (2016a).
25. V. P. Goranskij, E. A. Barsukova, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 422 (2016b).
26. V. P. Goranskij, N. V. Metlova, S. Y. Shugarov, et al., *ASP Conf. Ser.* **363**, 214 (2007).
27. V. P. Goranskij, S. Y. Shugarov, E. A. Barsukova, and P. Kroll, *Inform. Bull. Variable Stars*, № 5511, 1 (2004).
28. C. Hayashi and T. Nakano, *Progress Theor. Physics* **34** (5), 754 (1965).
29. A. A. Henden, *ASP Conf. Ser.* **363** 3 (2007).
30. I. Iben, Jr., *Astrophys. J.* **141**, 993 (1965).
31. G. H. Jacoby, D. A. Hunter, and C. A. Christian, *Astrophys. J. Suppl.* **56**, 257 (1984).
32. T. Kamiński, M. Schmidt, R. Tylanda, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182** (1), 33 (2009).
33. T. Kamiński, R. Tylanda, and S. Deguchi, *Astron. and Astrophys.* **529**, A48 (2011).
34. S. Kimeswenger and S. P. S. Eyres, *Inform. Bull. Variable Stars*, № 5708, 1 (2006).
35. S. Kimeswenger, C. Lederle, S. Schmeja, and B. Armsdorfer, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **336** (2), L43 (2002).
36. T. Kipper, V. G. Klochkova, K. Annuk, et al., *Astron. and Astrophys.* **416**, 1107 (2004).
37. I. Kolka, T. Liimets, E. Kankare, et al., *Astronomer's Telegram*, № 2211, 1 (2009).
38. T. M. Lawlor, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **361** (2), 695 (2005).
39. S. R. Loebman, J. P. Wisniewski, S. J. Schmidt, et al., *Astron. J.* **149** (1), 17 (2015).
40. D. K. Lynch, R. J. Rudy, R. W. Russell, et al., *Astrophys. J.* **607** (1), 460 (2004).
41. G. H. Marion, J. Vinko, R. P. Kirshner, et al., *Astrophys. J.* **781** (2), 69 (2014).
42. P. Martini, R. M. Wagner, A. Tomaney, et al., *Astron. J.* **118** (2), 1034 (1999).
43. U. Munari, R. L. M. Corradi, A. Henden, et al., *Astron. and Astrophys.* **474** (2), 585 (2007a).
44. U. Munari, A. Henden, R. M. L. Corradi, and T. Zwitter, *AIP Conf. Ser.* **637**, pp. 52–56 (2002a).
45. U. Munari, A. Henden, S. Kiyota, et al., *Astron. and Astrophys.* **389**, L51 (2002b).
46. U. Munari, A. Henden, A. Vallenari, et al., *Astron. and Astrophys.* **434** (3), 1107 (2005).
47. U. Munari, H. Navasardyan, and S. Villanova, *ASP Conf. Ser.* **363**, 13 (2007b).
48. M. F. Nieva and N. Przybilla, *EAS Publ. Ser.* **43**, pp. 167–187 (2010).
49. A. Pastorello, E. Mason, S. Taubenberger, et al., *Astron. and Astrophys.* **630**, A75 (2019).
50. R. Popham, S. Kenyon, L. Hartmann, and R. Narayan, *Astrophys. J.* **473**, 422 (1996).
51. J. L. Prieto, P. Chen, S. Dong, et al., *Research Notes Amer. Astron. Soc.* **1** (1), 28 (2017).
52. T. Rauch, P. Hauschildt, M. Asplund, et al., *ASP Conf. Ser.* **279**, 345 (2002).
53. A. Retter and A. Marom, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **345** (2), L25 (2003).
54. Т. В. Рузмайкина, в: *Физика космоса. Маленькая энциклопедия*, Ред. Р. А. Сюняев (Советская энциклопедия, Москва, 1986), p. 179.
55. B. D. Savage and J. S. Mathis, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **17**, 73 (1979).
56. G. Schaller, D. Schaerer, G. Meynet, and A. Maeder, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **96**, 269 (1992).
57. M. M. Shara, O. Yaron, D. Prialnik, et al., *Astrophys. J.* **725** (1), 831 (2010).
58. I. S. Shklovskij, *Stars: their birth, life and death* (Nauka, Moscow, 1984), p. 84 [in Russian].
59. N. Smith, J. E. Andrews, S. D. Van Dyk, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **458** (1), 950 (2016).
60. N. Soker and R. Tylanda, *Astrophys. J.* **582** (2), L105 (2003).
61. W. B. Sparks, H. E. Bond, M. Cracraft, et al., *Astron. J.* **135** (2), 605 (2008).
62. В. Ю. Теребиж, *Анализ временных рядов в астрофизике* (Наука, Москва, 1992).
63. D. Yu. Tsvetkov, I. M. Volkov, E. I. Sorokina, et al., *Variable Stars* **32**, 6 (2012).
64. R. Tylanda, M. Hajduk, T. Kamiński, et al., *Astron. and Astrophys.* **528**, A114 (2011a).
65. R. Tylanda and T. Kamiński, *Astron. and Astrophys.* **548**, A23 (2012).

66. R. Tylenda, T. Kamiński, and M. Schmidt, *Astron. and Astrophys.* **503** (3), 899 (2009).
67. R. Tylenda, T. Kamiński, M. Schmidt, et al., *Astron. and Astrophys.* **532**, A138 (2011b).
68. R. Tylenda and N. Soker, *Astron. and Astrophys.* **451** (1), 223 (2006).
69. R. M. Wagner, G. Schwarz, S. Starrfield, et al., *IAU Circ.*, № 8202, 1 (2003).

Progenitor and Remnant of the Luminous Red Nova V838 Monocerotis

V. P. Goranskij, E. A. Barsukova, A. N. Burenkov, A. F. Valeev, A. V. Zharova,
P. Kroll, N. V. Metlova, and S. Yu. Shugarov

The article presents the results of multicolor photometry, medium and low resolution spectroscopy of the red nova V838 Mon remnant for 16 years after the 2002 outburst. We also used the archival photometry with the photographic plates of the Sonneberg and Moscow collections from 1928 to 1994. Analysis of these observational data confirmed that the progenitor of the V838 Mon explosion was a wide pair of B3 V type stars of reduced luminosity. A brighter component exploded; it was 36 per cent brighter than its companion, and located on the zero-age main sequence of the Spectrum–Luminosity Diagram. Immediately after the outburst, in the fall of 2002, the remnant was a brown L-type supergiant (sgL), but in the fall of 2003 its spectrum changed to M type with a blue radiation excess appeared in the spectral energy distribution, which we interpreted as the reflection effect of the B type companion on the dust forming on the M star. In 2008, the companion was engulfed by the expanding explosion remnant, a type M supergiant (sgM). When the companion was immersing in the expanding M-star, a void was discovered under the M-star upper layer, in which the companion moved for about 200 days. Over the past 10 years, the luminosity of the M-star has increased in the V filter by a factor of 10, and the spectral type has changed from M7.5 to M5.5. Based on radial velocities in the Ba II 6497 Å and Ca I 6572 Å lines, a deceleration of the expanding envelope of the M supergiant was detected, and in 2018, the envelope velocity approached to the heliocentric velocity of the star $+71 \text{ km s}^{-1}$. Quasi-periodic changes with a period of 320 days appeared then in the light curves, especially clearly expressed in I filter. We assume that the remnant has an elongated structure, and its rotation period is about 640 days. This is probably a gigantic contact system that will become a detached binary system in future development. The observations do not confirm the assumption that the explosion of one of the V838 Mon components was due to the merger of a compact binary system components located in a hierarchical triple one. Two hypotheses were proposed on the nature of the explosion of one of the V838 Mon components, directly based on the early age of this system: (1) the ignition of thermonuclear burning of hydrogen in the core after the gravitational compression of a protostar; (2) the fragmentation of the core inside a rapidly rotating star in the stage of gravitational compression of a protostar, and later, the subsequent defragmentation (merger of the core components) due to the loss of torque.

Keywords: *stars: novae, cataclysmic variables—photometry, spectroscopy—stars: individual: V838 Mon*