

УДК 524.35:520.8

SN 2015bh В NGC 2770: КОЛЛАПС ЯДРА LBV ПРИ СЛИЯНИИ КОМПОНЕНТОВ В ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ

© 2016 В. П. Горанский^{1*}, Е. А. Барсукова², А. Ф. Валеев^{2,3},
Д. Ю. Цветков¹, И. М. Волков¹, В. Г. Метлов¹, А. В. Жарова¹

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119899 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская 18, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 8 июня 2016 года; принята в печать 7 октября 2016 года

Представлены результаты спектроскопии и фотометрии оптического транзиента PSN J09093496+3307204 в галактике NGC 2770, который впоследствии перешел в фазу сверхновой и получил обозначение SN 2015bh. Спектральные наблюдения среднего разрешения проводились в период с февраля 2015 г. по май 2016 г. на российском 6-м телескопе БТА с фокальным редуктором SCORPIO и сопровождались фотометрическими наблюдениями на БТА и на шести телескопах с апертурой 0.5–1.0 м. В спектрах звезды как в фазе транзиента (импостора, 2015a), так и в фазе сверхновой (2015b), кроме бальмеровских эмиссий, видны сильные эмиссии Fe II, так что эти спектры похожи на спектры классических новых типа Fe II по Вильямсу. С учетом околозвездного, межзвездного и галактического поглощения $A_V = 1^m14 \pm 0^m15$ звезда достигла абсолютной величины $M_V = -15^m0 \pm 0^m3$ в фазе 2015a и $M_V = -18^m14 \pm 0^m30$ в фазе 2015b. Кривая блеска в фазе 2015b похожа на кривые блеска SN IIL. Предшественник сверхновой — голубая переменная звезда высокой светимости (LBV) с мощной эмиссией H α . Для объяснения наблюдательных данных рассмотрено несколько гипотез вспышек сверхновых после оптических транзиентов, связанных с LBV. Предпочтительной для события 2015bh выбрана гипотеза коллапса ядра проэволюционировавшей массивной звезды при слиянии с компонентом в двойной системе (несостоявшаяся красная новая).

Ключевые слова: *сверхновые: общее — новые, катаклизмические переменные — сверхновые: индивидуальные: SN 2015bh, PSN J09093496+3307204*

1. ВВЕДЕНИЕ

7 февраля 2015 г. в обзоре неба Catalina Real-Time Transient Survey и 8 февраля 2015 г. С. Ховертоном в процессе наблюдений по программе SNhunt¹ был открыт оптический транзиент PSN J09093496+3307204 в галактике NGC 2770. Транзиент известен также под именами SN 2015bh и SN hunt275. По спектру, полученному в обсерватории Азиаго 9 февраля, в котором видна широкая эмиссия H α (FWHM ~ 6800 км с⁻¹) с узким эмиссионным компонентом на вершине, транзиент был классифицирован как импостор сверхновой (SN) [1]. Отмечалось сходство с объектами 2000ch и 2009ip (перед вспышкой последнего как SN в июне 2012 г.). Понятие «импосторов сверхновых» как сверхвспышек звезд LBV, при которых эти

звезды выживают и наблюдаются через несколько лет после взрывов в отличие от SN IIp, которые разрушаются при коллапсе ядра, введено в [2]. Аналогом импостора SN может быть вспышка η Car 1844–1850 годов. В марте–апреле 2015 г. транзиент 2015bh наблюдался на телескопе 10.4-м GTC [3]. В это время его блеск увеличивался, и его абсолютная величина в полосе r -SDSS достигла -14^m2 .

16 мая 2015 г. появилось сообщение о резком увеличении блеска транзиента на 2^m [4]. Абсолютная величина в фильтре R достигла -16^m4 . В спектрах с телескопа Кека I 16 мая виден горячий континуум, с бальмеровскими эмиссиями, линиями He II и He I в эмиссии [5]. Стало ясно, что произошел новый взрыв импостора, и что события развивались по сценарию SN 2009ip [6–9]. Продолжавшиеся наблюдения [10–12] подтвердили гипотезу, что транзиент перешел в фазу SN. По аналогии с другими работами первую вспышку или

*E-mail: goray@sai.msu.ru

¹<http://www.rochesterastronomy.org/sn2015/snhunt275.html>

фазу импостора мы будем обозначать как 2015a, вторую вспышку или фазу SN — 2015b.

Родительская галактика SN 2015bh NGC 2770 расположена на расстоянии $d = 29.70 \pm 3.4$ Мпс, лучевая скорость $v_r = 1947$ км с⁻¹, галактическое поглощение света $A_V = 0^m.062$ (NED). До события 2015 г. в галактике NGC 2770 в течение короткого срока 10 лет вспыхнули три SN редкого типа Ib, из-за чего галактику называют «фабрикой сверхновых типа Ib» [13]. Это SNe 1999eh, 2007uy и 2008D. Последняя интересна тем, что с ней был связан рентгеновский транзиент. В [13] приведено изображение, комбинированное из трех изображений галактики, полученных на телескопе VLT 16 марта

2008 г. в фильтре I , в фильтре $H\alpha$, смещенном на $z = 0.007$ с центром на 6604 \AA шириной 64 \AA и в фильтре $H\alpha$ на $z = 0$ с центром на 6563 \AA шириной 61 \AA . Кроме двух SN 2007 и 2008 гг. там виден предшественник SN 2015bh, который выделяется избытком излучения в линии $H\alpha$. Это одна из ярчайших звезд галактики. По данным HST 2008–2009 годов была обнаружена переменность блеска предшественника SN 2015bh в пределах $21^m.5$ – $22^m.8$ в красном фильтре F606W [1]. В настоящей работе мы показываем результаты нашего фотометрического и спектрального исследования SN 2015bh.

Таблица 1. Фотометрия SN 2015bh в NGC 2770

HJD 2400000+	B	V	R_C	I_C	ID
57076.491	19.65 (5)	19.26 (5)	18.71 (4)	18.60 (5)	6m
57078.373	19.58 (8)	19.19 (5)	18.58 (4)	18.44 (5)	6m
57100.284	19.37 (5)	18.84 (3)	18.45 (2)	—	SO
57164.255	15.58 (4)	15.38 (2)	15.21 (2)	15.17 (4)	SO
57164.266	15.58 (4)	15.37 (2)	15.21 (2)	—	SO
57165.248	15.57 (4)	15.35 (2)	15.21 (2)	15.10 (4)	SO ¹
57165.338	15.54 (5)	15.35 (3)	15.18 (4)	—	IW
57166.320	—	15.27 (2)	15.14 (2)	—	SO
57167.28	15.57 (6)	15.36 (5)	15.27 (4)	14.98 (5)	IW
57168.29	15.61 (7)	15.39 (5)	15.19 (5)	15.01 (5)	IW
57169.32	—	—	15.24 (6)	—	A2
57174.27	15.91 (7)	15.56 (5)	15.40 (5)	15.23 (5)	IV
57175.28	16.02 (8)	15.62 (2)	15.45 (5)	15.22 (5)	IV
57175.30	16.00 (7)	15.65 (2)	15.42 (5)	15.21 (5)	IV
57176.36	16.14 (7)	15.71 (5)	15.44 (5)	15.25 (5)	IV
57177.34	16.11 (5)	15.67 (3)	15.42 (5)	15.09 (1)	IV
57179.31	16.08 (7)	15.77 (5)	15.50 (5)	15.23 (5)	IV
57180.3	16.21 (6)	15.77 (5)	15.45 (4)	15.07 (1)	A5
57181.3	16.31 (6)	15.86 (5)	15.55 (5)	15.28 (5)	IV
57182.3	16.25 (6)	15.88 (5)	15.59 (4)	15.34 (4)	A5
57183.3	16.30 (6)	15.87 (5)	15.69 (4)	15.37 (4)	A5
57184.257	—	15.91 (2)	15.68 (4)	—	SO
57184.27	16.42 (7)	15.92 (2)	15.64 (3)	15.33 (4)	IV
57185.272	16.51 (3)	15.93 (2)	15.64 (2)	15.37 (4)	SO ²

Таблица 1. Продолжение

HJD 2400000+	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R_C</i>	<i>I_C</i>	ID
57186.29	16.54 (7)	15.94 (2)	15.69 (4)	15.38 (4)	IV
57187.285	—	16.01 (3)	—	—	6m
57188.33	16.65 (7)	16.09 (5)	15.78 (4)	15.49 (5)	IV
57190.3	16.73 (6)	16.07 (5)	15.81 (5)	15.40 (4)	A5
57276.55	—	—	18.31 (20)	17.49 (15)	SO
57313.59	—	—	19.45 (11)	—	FL
57330.58	—	—	19.64 (10)	—	A5
57331.58	—	—	—	18.71 (8)	A5
57332.58	—	20.33 (20)	—	—	A5
57340.45	—	—	19.77 (14)	—	A5
57340.54	21.37 (17)	20.67 (12)	19.57 (2)	—	6m
57369.50	—	20.84 (22)	19.69 (3)	—	SO
57373.53	21.48 (6)	20.85 (08)	19.71 (11)	—	6m
57426.483	—	21.60 (12)	20.33 (2)	20.27 (20)	SO
57456.468	22.16 (9)	21.95 (18)	20.48 (3)	—	SO
57457.404	—	—	—	20.58 (11)	SO
57458.326	21.96 (12)	21.56 (12)	20.20 (5)	—	6m
57512.311	—	21.96 (17)	20.47 (5)	—	SO
57539.3	—	22.4 (9)	—	—	6m

¹ $U = 14.75$ (3)² $U = 16.21$ (5)

ID — Телескопы и приборы: идентификация.

6m — 6-м телескоп БТА и редуктор светосилы SCORPIO с фильтрами системы BVR_CI_C с ПЗС EEV42-40 [14];

A2 — 70-см телескоп АЗТ-2 ГАИШ в Москве с ПЗС Argee Ар-7;

A5 — 50-см менисковый телескоп Максутова Крымской станции МГУ с ПЗС Argee Alta U8300;

FL — 60-см телескоп Цейсса Крымской станции МГУ и $UBVR_C R_J I_J$ -фотометр с ПЗС FLI PL4022;

IV — 1-м телескоп Цейсса Симеизской обсерватории в Крыму с ПЗС FLI PL09000;

IW — 60-см телескоп Цейсса Симеизской обсерватории в Крыму с ПЗС VersArray 512UV;

SO — 1-м телескоп Цейсса CAO РАН и $UBVR_CI_C$ -фотометр с ПЗС EEV 42-40.

2. ФОТОМЕТРИЯ

Изображения в полосах системы UBV Джонсона и RI Козинса были получены на БТА с редуктором светосилы SCORPIO [14] (при проведении спектральных наблюдений), а также с ПЗС-фотометрами на телескопе Цейсс-1000

CAO РАН, на 70-см телескопе АЗТ-2 ГАИШ МГУ в Москве, на Цейсс-600 и 50-см менисковом телескопе Максутова АЗТ-5 Крымской наблюдательной станции МГУ, и на телескопах Цейсс-1000 и Цейсс-600 Симеизской обсерватории в Крыму. Наблюдения проводились в период с 24 февраля 2015 г. по 30 мая 2016 г. (JD 2457076–2457539) с

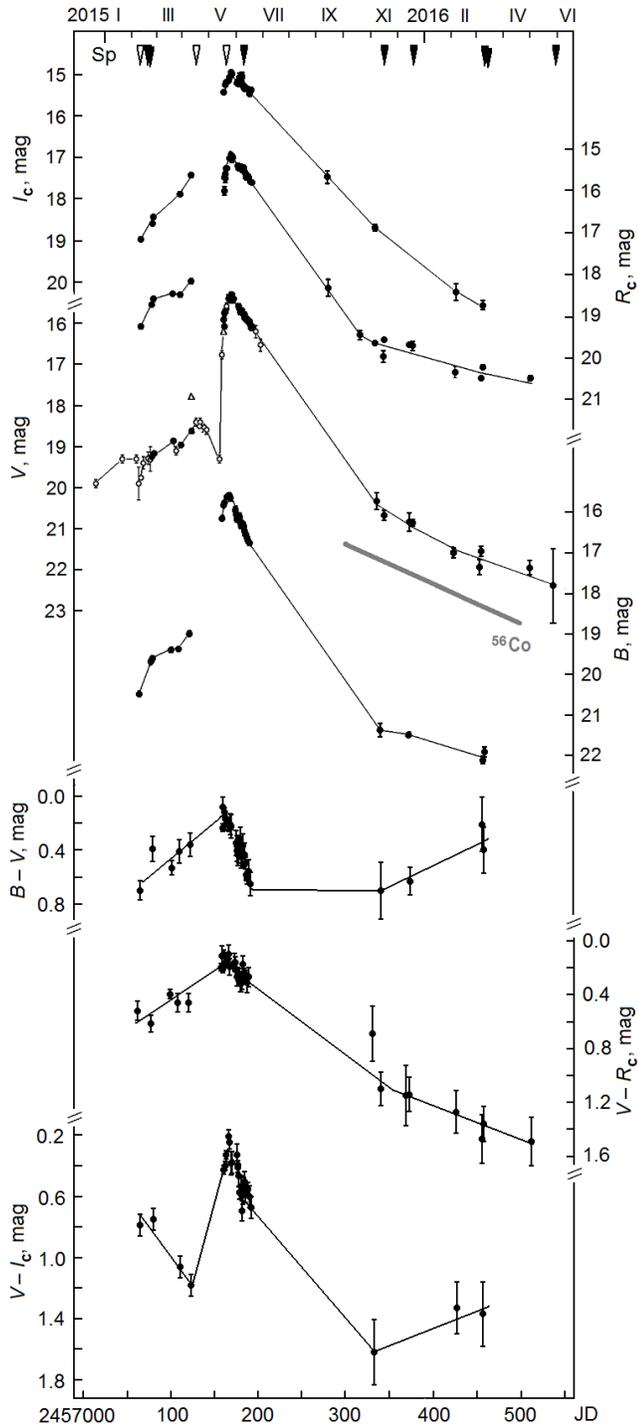


Рис. 1. Кривые блеска и показатели цвета SN 2015bh в полосах системы *BVRI*. Обозначения описаны в тексте. Серой линией показана средняя скорость падения блеска SN I и II, обусловленная радиоактивным распадом кобальта-56. Вверху отмечены моменты спектральных наблюдений в настоящей работе (темные указатели) и из Интернета (светлые указатели).

перерывом между 16 июня и 10 сентября 2015 г. (JD 2457190–2457276), когда объект находился в соединении с Солнцем и был недоступен для наблюдений. В качестве звезд сравнения мы использовали звезды стандарта из [15] в окрестностях галактики NGC 2770 в системе *UBV* Джонсона и *RI* Козинса. Результаты — 43 наблюдения, многоцветных или в отдельных фильтрах, представлены в таблице 1. Полная коллекция наблюдений SN 2015bh, включающая опубликованные данные других авторов и пополняемая новыми, доступна в Интернете^{2,3}. В деталях кривые блеска и поведение показателей цвета можно рассмотреть с Java-совместимым браузером^{4,5}. В таблице 1 после каждого наблюдения в скобках дана точность измерений в единицах последнего знака. В примечаниях к таблице находится информация о телескопах и приемниках излучения, использованных в наблюдениях. Между рядами наших наблюдений, полученных с разными приборами, имеются небольшие систематические различия. Они были определены по одновременным измерениям и компенсированы поправками. При слабом блеске звезды (после соединения с Солнцем) мы увеличивали суммарное время экспозиции до 1300–6000 с, чтобы достичь высокого отношения сигнала к шуму. При длительных экспозициях основным фактором, определяющим ошибку измерений, был неравномерный окружающий фон галактики, так как звезда расположена в плотной звездном поле на внутренней границе спиральной ветви вблизи темной пылевой туманности. Кривые блеска и показатели цвета в системе *UBVR_cI_c* представлены на рис. 1. Кроме наших наблюдений здесь собраны данные, опубликованные в [1, 3] (переведены в систему *UBVR_cI_c* из величин системы SDSS) и в [10, 11]. Эти наблюдения показаны точками. Кружками на кривую блеска в полосе *V* нанесены наблюдения из коллекции Ховертона (S. Hovertov)⁶, Кейсона (A. Cason) и Арбора (R. Arbour)⁷. Они проводились с различными ПЗС и в основном без фильтров, но неплохо согласуются с нашими данными в фильтре *V*. Треугольниками выделены наблюдения Жиянь Су и Синг Гао (Zhijian Xu, Xing Gao) из коллекции Ховертона. Первая их оценка блеска 2015 Apr 7.74 UT, *mag* = 17.8 (без фильтра) значительно, на 0^m8, уклоняется вверх от кривой блеска и от близкого измерения [3],

²<http://jet.sao.ru/~goray/psn0909.ne3>

³<http://vgoranskij.net/psn0909.ne3>

⁴<http://jet.sao.ru/~goray/psn0909.htm>

⁵<http://vgoranskij.net/psn0909.htm>

⁶<https://www.flickr.com/photos/watchingthesky/17162602585/>

⁷<http://www.rochesterastronomy.org/sn2015/snhunt275.html>

и потому требует проверки. Не исключено, что им удалось зарегистрировать кратковременную вспышку. Кружками нанесены также отдельные наблюдения Локателли (G. Locatelli, Flickr.com) и Маси (G. Masi, CBAT).

При построении цветовых кривых $B - V$, $V - RC$ и $V - IC$ (рис. 1) по нашим данным использовались не только одновременные наблюдения, полученные в отдельные ночи, но и наблюдения в соседние ночи в интервале 1–2 дня. При слабом блеске требовалось накопление сигнала до двух часов, что выполнить в одну ночь для всех фильтров было невозможно. С другой стороны, в период наблюдений после соединения с Солнцем изменения блеска объекта за два дня были значительно меньше ошибок измерений, так что показатели цвета вполне реалистичны.

К тому же мы измерили блеск предшественника 2015bh по цветному изображению галактики NGC 2770 от 6 марта 2008 г., выставленному на сайте телескопа Gemini. Оно составлено из отдельных снимков в фильтрах *gri* системы SDSS и в фильтре $H\alpha$. Мы разложили это изображение на компоненты RGB. В качестве звезд сравнения использовались самые слабые звезды из базы данных SDSS в окрестностях галактики NGC 2770. Результаты измерений в фильтрах *g*, *r*, полученные в системе AB95 [16] были переведены в систему *V* Веги.

3. СПЕКТРОСКОПИЯ

Спектральные наблюдения среднего разрешения были проведены в САО РАН на 6-м телескопе БТА с фокальным редуктором SCORPIO [14] в течение 8 ночей в период между 23 февраля 2015 г. и 30 мая 2016 г. (JD 2457076–2457539). Спектры получены за 88 и 87 дней до главного максимума блеска сверхновой, через 22 дня после этого максимума, и в фазе медленного спада блеска, которая наступила сразу после появления объекта из-за Солнца, в период от 176 до 374 дней после максимума. В таблице 2 содержится основная информация о спектрах: дата и юлианская дата, время в днях при отсчете от максимума блеска, суммарная продолжительность экспозиции в секундах, спектральный диапазон, спектральное разрешение, гризма, гелиоцентрическая поправка и отношение сигнал/шум в континууме в середине спектрального диапазона. Естественно, отношение сигнал/шум в профилях спектральных линий значительно больше. Обработка спектров выполнена в ОС Linux с использованием среды ESO MIDAS и контекста LONG (для спектров с длинной щелью). Спектры в красном диапазоне

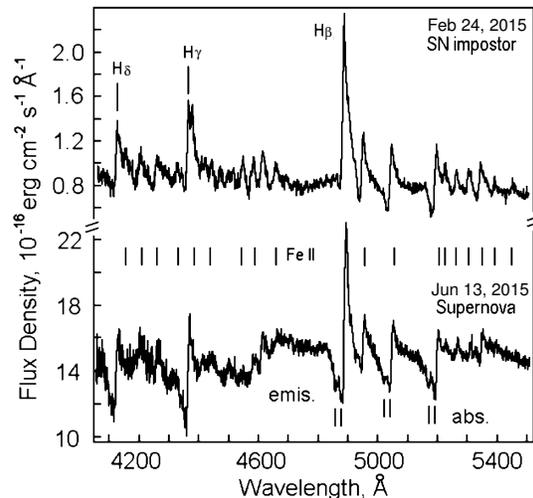


Рис. 2. Спектры SN 2015bh в синем и зеленом диапазонах в стадии импостора 2015a (вверху) и сверхновой 2015b через 22 дня после максимума блеска (внизу). *emis.* — высокоскоростной эмиссионный компонент в линии $H\beta$. В нижнем спектре показаны раздвоенные узкие компоненты околозвездной среды (*abs.*), сформировавшейся до 2015b.

на длинах волн $\lambda > 6800 \text{ \AA}$ искажены интерференционной картиной (*fringes*). Поскольку отношение сигнал/шум в спектрах, полученных в ноябре 2015 г. и позднее, слишком мало (2–4), мы сгладили спектры методом скользящего среднего с интервалом усреднения 3.5–15 \AA , равным фактическому спектральному разрешению каждого спектра. Для перевода спектров в энергетические единицы использовали спектрофотометрические стандарты из [17], а также одновременные фотометрические наблюдения. В цифровом виде спектры доступны в Интернете⁸. Моменты наших спектральных наблюдений отмечены на графике кривой блеска в фильтре *V* (рис. 1, темные треугольники вверху). Там же отмечены моменты наблюдений спектров, опубликованных другими авторами (светлые треугольники), эти спектры или их описания имеются в Интернете.

4. ЭВОЛЮЦИЯ ВО ВСПЫШКЕ

4.1. Фаза импостора 2015a

Эта фаза покрыта наблюдениями с 21 декабря 2014 г. по 25 апреля 2015 г. или в пределах JD 2457013–2457138. В это время фотометрия в полосе *V* показывает постепенный подъем блеска со средней скоростью $0^m.015$ в день ($0^m.75$ за 50 дней). Наблюдалась флуктуация блеска с

⁸<http://jet.sao.ru/~bars/spectra/psn0909/>

Таблица 2. Спектры SN 2015bh в NGC 2770, полученные на БТА/SCORPIO

Дата UT	HJD 24+	Δt	ϵ , с	λ , Å	R, Å	Гризма	Δv_r , км с ⁻¹	S/N
Feb 23, 2015	57076.5160	-88	3600	5751-7501	5.5	VPHG1200R	-11.7	22
Feb 24, 2015	57078.3933	-87	3600	4053-5847	5.0	VPHG1200G	-12.7	15
Jun 13, 2015	57187.2982	+22	1800	4056-5850	5.0	VPHG1200G	-21.2	30
Nov 14, 2015	57340.5885	+176	3600	4048-5846	5.0	VPHG1200G	+28.4	3
Dec 17, 2015	57373.5602	+209	4800	3740-7877	14.6	VPHG550G	+20.5	2
Mar 10, 2016	57458.2293	+293	3600	4043-5846	5.5	VPHG1200G	-18.3	2
Mar 12, 2016	57460.3973	+295	2400	6024-7096	3.5	VPHG1800R	-19.4	4
May 30, 2016	57539.3346	+374	2400	6025-7098	3.0	VPHG1800R	-24.9	1

¹ Континуум в спектре ниже уровня шума.

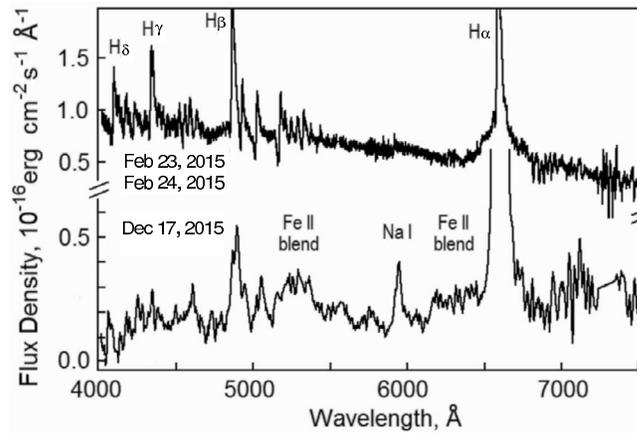


Рис. 3. Полные спектры SN 2015bh в фазе 2015а и в фазе 2015b на вторичном спаде блеска.

амплитудой в несколько десятых долей звездной величины, кратковременное его ослабление на 0^m9 около JD 2457066 и падение блеска примерно на 1^m перед подъемом к главному максимуму. В фазе 2015а он достиг уровня 18^m4 (ПЗС без фильтра). Падение блеска перед подъемом к главному максимуму (JD 2457153, 19^m3), зарегистрированное Ховертоном, — очень важное наблюдение для понимания природы 2015bh. Однако нужно отметить, что это наблюдение единственное. В фазе 2015а показатели цвета $B - V$ и $V - R_C$ постепенно уменьшались, что свидетельствует об увеличении температуры звезды, но $V - I_C$ имеет противоположную тенденцию.

На рис. 2 показаны спектры SN 2015bh в синей и зеленой области в фазе 2015а (вверху) и в фазе 2015b вблизи максимума блеска (внизу). Полный спектр звезды в фазе 2015а, составленный из спектров 23 и 24 февраля 2015 г. и включающий красный диапазон, показан на рис. 3 (вверху). В первом

приближении эти спектры соответствуют описаниям в [1, 3, 4]. В красном спектре, полученном 23 февраля 2015 г. в фазе 2015а, видна узкая линия $H\alpha$ со слабым абсорбционным компонентом, смещенным в коротковолновую сторону. Пик эмиссии приходится на скорость 1900 км с⁻¹, или с учетом красного смещения галактики на -47 км с⁻¹. Ширина узкого эмиссионного компонента на уровне половины максимума его интенсивности с учетом инструментального профиля, $FWHM$ составляет 640 км с⁻¹. Этот компонент имеет эмиссионный горб в красном крыле на скорости +870 км с⁻¹. Узкий абсорбционный компонент расположен симметрично относительно максимума эмиссии на скорости -900 км с⁻¹. Эти скорости измерены относительно пика эмиссии. Линия $H\alpha$ имеет очень широкие крылья в эмиссии, распространяющиеся в каждую сторону от пика до 10 000 км с⁻¹. Таковую же структуру имеет профиль линии $H\beta$, в профи-

ле присутствует и горб на скорости $+870 \text{ км с}^{-1}$. В этой линии в эмиссии прослеживается только коротковолновое крыло, которое распространено до -8500 км с^{-1} . Длинноволновое крыло искажено эмиссионными линиями Fe II. Несомненно, что очень широкие крылья бальмеровских линий не связаны с движением больших масс вещества, а являются следствием томсоновского рассеяния бальмеровских квантов на свободных электронах. Сильные линии Fe II имеют профили типа P Cуг.

4.2. Фаза сверхновой 2015b

Подъем блеска SN (начало фазы 2015b) зарегистрирован с 13 мая 2015 г. (JD 2457156). Максимум блеска в фазе 2015b наступил 22 мая 2015 г. в момент $\text{JD } 2457165 \pm 1^{\text{д}}$. Звездные величины в максимуме были следующие: $U = 14^{\text{m}}75$, $B = 15^{\text{m}}57$, $V = 15^{\text{m}}35$, $R_C = 15^{\text{m}}21$, $I_C = 15^{\text{m}}10$ (по измерениям на телескопе Цейсс-1000 САО РАН). На телескопе Цейсс-600 Симеизской обсерватории получены близкие величины: $B = 15^{\text{m}}54$, $V = 15^{\text{m}}35$, $R_C = 15^{\text{m}}18$. На кривой блеска SN (2015b) мы выделяем первоначальный линейный спад блеска после максимума 22 мая—17 октября 2015 г. (JD 2457165—2457313) и вторичный спад после 17 октября 2015 г. (JD > 2457313). Скачкообразный переход в скорости падения блеска от первоначального ко вторичному спаду виден во всех полосах кроме I_C . На первоначальном спаде в первые 50 дней уменьшение блеска в фильтрах BVR_CI_C было соответственно, $2^{\text{m}}0$, $1^{\text{m}}5$, $1^{\text{m}}3$ и $1^{\text{m}}0$. Острый пик в максимуме и линейное падение блеска в шкале звездных величин в течение приблизительно 150 дней после максимума характерны для кривых блеска SN III. Значительную часть этого времени звезда была недоступна для наблюдений. Однако сентябрьские наблюдения в фильтрах R_C и I_C , сделанные сразу после появления объекта из-за Солнца, подтверждают линейность первоначального спада. По суммарной кривой блеска сверхновых типа III⁹ в фильтре B темп падения блеска меняется в пределах $2^{\text{m}}2$ — $3^{\text{m}}0$ за 50 дней. SN 2015bh показывает в этом фильтре меньшую скорость падения блеска, $2^{\text{m}}0$. При сравнении с наблюдениями в фильтре V отдельных сверхновых SN III 1980K ($1^{\text{m}}9$), 1998S ($1^{\text{m}}5$)¹⁰ и 2008if ($1^{\text{m}}4$) [18] кривая блеска SN 2015bh все-таки выглядит типичной для SN III. Затем на вторичном спаде в конце октября 2015 г. темп падения блеска значительно уменьшился, особенно в фильтре R_C .

Наиболее медленное уменьшение блеска в R_C явно связано с постепенным увеличением вклада эмиссии $\text{H}\alpha$ при ослаблении континуума в длинноволновом диапазоне. На рис. 1 толстой серой прямой линией показана скорость падения блеска на вторичном спаде вследствие радиоактивного распада изотопа ^{56}Co (как у SN I, так и у некоторых SN II). Средний наклон на 200-дневном вторичном спаде блеска в фильтре V (где вклад эмиссионных линий минимален) составил $0^{\text{m}}0092$ в день ($0^{\text{m}}46$ за 50 дней), что соответствует гипотезе о радиоактивном распаде ^{56}Co , и подтверждает предположение о природе события 2015b как сверхновой.

При взрыве SN в фазе 2015b звезда была наиболее горячей на восходящей ветви в момент JD 2457159, за 6 дней до максимума. В это время ее показатели цвета были $U - B = -0^{\text{m}}85$, $B - V = +0^{\text{m}}08$ (по данным SWIFT/UVOT в системе ubv AB [10], переведенным нами в систему UBV Веги). Этот факт подтверждается спектральными наблюдениями на телескопе Кекка [5], когда наблюдался горячий континуум и эмиссия $\text{He II } 4686 \text{ \AA}$. Учитывая, что в это время в полосах UBV доминировал горячий континуум и вклад эмиссий был малым (предположительно менее 3%), по двухцветной диаграмме $(U - B) - (B - V)$ мы определили избыток цвета $E(B - V) = 0^{\text{m}}37 \pm 0^{\text{m}}05$ и поглощение $A_V = 1^{\text{m}}14 \pm 0^{\text{m}}15$. Эта оценка межзвездного поглощения включает в себя как поглощение в нашей Галактике, так и поглощение в галактике NGC 2770 вместе с околосредой. С учетом такого поглощения на луче зрения абсолютная визуальная величина SN в максимуме блеска была $M_V = -18^{\text{m}}14 \pm 0^{\text{m}}30$. При этом в стадии импостора 2015a эта величина достигала $M_V = -15^{\text{m}}0 \pm 0^{\text{m}}3$ (или даже $M_V = -15^{\text{m}}7$, если верить результату Жюан Су и Синг Гао, который обсуждался ранее). Таким образом, из данных фотометрии следует, что событие 2015b по форме кривой блеска и по абсолютной величине в максимуме можно интерпретировать как реальную SN.

Начиная с первого момента регистрации SN на восходящей ветви вспышки 2015b, во всех показателях цвета наблюдалось постепенное покраснение. Очевидно, что такое покраснение происходило из-за расширения сброшенной оптически толстой газовой оболочки и падения температуры ее поверхности. После перерыва в наблюдениях поведение показателей цвета изменилось. Показатели цвета $B - V$ и $V - I_C$ стали более голубыми, в то время как покраснение $V - R_C$ продолжалось с тем же темпом. Мы объясняем это переходом

⁹<http://burro.cwru.edu/academics/Astr221/LifeCycle/observingSN.html>

¹⁰<http://dau.itep.ru/sn/lc>

оболочки в оптически тонкое состояние, в результате чего на поверхность выходит излучение из горячих внутренних слоев. Однако в цвете $V - R_C$ увеличивается вклад эмиссионной линии $H\alpha$ по отношению к горячему континууму, из-за чего увеличение этого показателя продолжается. Показатель цвета $V - R_C$ за 11 месяцев после максимума блеска увеличился на 1^m4 . Подобные изменения показателей цвета происходят у некоторых классических новых и связаны с теми же изменениями в структуре сброшенных оболочек.

В фазе 2015b в голубом спектре 13 июня 2015 г. в профилях бальмеровских линий появился широкий и глубокий абсорбционный компонент, распространяющийся до скоростей -4000 км с^{-1} . В глубине этого компонента осталась узкая абсорбционная деталь на скорости -900 км с^{-1} , наблюдавшаяся ранее в фазе 2015a, и появилась новая абсорбционная деталь на скорости -1900 км с^{-1} (эти детали отмечены на рис. 2). Такие же широкие абсорбции с двойными абсорбционными деталями наблюдаются в фазе 2015b в сильных линиях Fe II. Значительная асимметрия эмиссионных компонентов в P Cyg-профилях $H\alpha$, $H\beta$, сильных эмиссий Fe II, их треугольная форма свидетельствуют об избыточном поглощении в голубом крыле профиля в диапазоне скоростей между -3300 и -250 км с^{-1} в фазе 2015b (если наложить на профиль его зеркальное отражение, как это сделано, например, в [19] на рис. 6 для спектра красной новой NGC 4490-OT2011). Такая структура профилей формируется плотной оптически толстой сброшенной оболочкой, причем ее формирование происходило уже в фазе 2015a. Наблюдение горячего континуума с бальмеровскими эмиссиями, с линиями He II и He I в эмиссии 16 мая 2015 г. в [5] свидетельствует о выходе ударной волны на подъеме блеска вспышки 2015b, из-за чего в профилях линий через месяц появились абсорбционные компоненты с большой скоростью, но при этом сохранился компонент со скоростью -900 км с^{-1} , сформированный еще до событий 2015 года в среде, до которой ударная волна еще не дошла. В фазе 2015b часть этой среды получила ускорение световым давлением вспышки, и образовался второй узкий абсорбционный компонент на скорости -1900 км с^{-1} . Интересен наблюдательный факт, что скорость узкого абсорбционного компонента -900 км с^{-1} на голубом крыле бальмеровских линий совпадает со скоростью эмиссионного компонента (горба или плеча) на красном крыле. Этот факт может означать, что формирование первичной среды происходило под воздействием биполярного ветра, который истекал под большим телесным углом. Часть такого конического истечения, направленного к наблюдателю, поглощает свет опти-

чески толстой оболочки, а противоположная часть видна в эмиссии. К тому же эти узкие компоненты показывают, что первичная околозвездная среда распространялась на значительно большие расстояния, чем фотосфера сброшенной оболочки, формирующая профили типа P Cyg.

Сильные линии Fe II являются характерной особенностью спектров SN 2015bh как в фазе 2015a, так и в фазе 2015b. Так что эти спектры более напоминают спектры классических новых типа Fe II по Вильямсу [20], чем сверхновых звезд. Конечно, масштабы взрыва SN 2015bh превышают масштабы классических новых. Светимость в фазе 2015a превосходит светимость самых ярких классических новых звезд в максимуме блеска в 100 раз, в фазе 2015b в 1600 раз. Внешнее сходство спектров новых и SN 2015bh требует детального исследования, так как в [3, 5] отмечается присутствие линий He I и даже He II, которые у классических новых типа Fe II не наблюдаются, кроме редких случаев гибридных новых. Другой тип классических новых, He/N по Вильямсу, имеет линии He I и He II в спектрах, и это основной признак типа He/N, но линии железа там не встречаются. Наиболее сильные линии He I в оптическом спектре ожидаются на длинах волн 4121, 4143, 4388, 4471, 4713, 4922, 5016, 5876 и 6678 Å. Разрешение наших спектров достаточно, чтобы установить, что компоненты He I отсутствуют в возможных блендах с сильными эмиссиями Fe II 4922 и 5018 Å (42-й мультиплет), а также в бленде с Na I 5889/5896 Å в фазе 2015a. Пики эмиссии на 4922 и 5018 Å совпадают по лучевой скорости с другими линиями Fe II. Не обнаружены и остальные линии He I. В спектре 13 июня 2015 г. в фазе 2015b на 22-й день после максимума есть слабая деталь в районе He I 4471 Å, отождествление которой с линией гелия сомнительно. Другие линии He I, включая компоненты в блендах с упоминавшимися ранее двумя линиями Fe II, не обнаруживаются. Кроме двух упоминавшихся сильных линий Fe II в наших спектрах надежно отождествляются эмиссии Fe II на следующих длинах волн в ангстремах (в скобках номер мультиплета): 4179 (28), 4233 (27), 4303 (27), 4352 (27), 4417 (27), 4523 (38), 4556 (37), 5169 (42), 5198 (49), 5235 (49), бленда 5276 (49)+5284 (41), 5317 (48,49), 5363 (48) и 5425 (48,49). Все эти линии присутствуют в списке эмиссионных линий классических новых в оптическом диапазоне (таблица 2) из работы Вильямса [20]. Кроме этих линий мы нашли две отсутствующие в этом списке, на 4590 и 4635 Å. Обе эмиссии сильны в наших спектрах классической новой V496 Sct типа Fe II

по Вильямсу, полученных 10 и 11 ноября 2009 г.¹¹ Согласно [21], рис. 1.10, обе линии присутствуют в спектре η Car, где отождествлены как бленды Fe II и Cr II. В фазе 2015a в наиболее сильных линиях 42-го мультиплета Fe II 4924, 5018 и 5169 Å абсорбционный компонент достигает скорости -1400 км с^{-1} . Это типичные скорости при сбросе оболочек у классических новых типа Fe II. Полуширина эмиссионного компонента примерно равна 940 км с^{-1} . В фазе 2015b абсорбционный компонент в профилях R Cug усилился, как и в бальмеровских линиях, а предельные скорости возросли до -4000 км с^{-1} . Такие скорости сброса оболочки превышают скорости быстрых классических новых типа Fe II высокой светимости, но малы для SN. При этом полуширина эмиссионного компонента осталась той же, что и в фазе 2015a, 940 км с^{-1} .

В синем спектре в фазе 2015b появилась очень широкая эмиссия, распространяющаяся в коротковолновую сторону от H β на 18000 км с^{-1} с максимумом плотности потока на $\lambda \sim 4640 \text{ Å}$ (отмечена как *emis.* на рис. 2 внизу). На эту эмиссию в красной ее части накладывается абсорбционный компонент линии H β . К сожалению, эмиссия видна только в одном спектре, и у нас нет наблюдений в линии H α вблизи максимума блеска, так что требуется ее подтверждение независимыми наблюдениями. Излучение выброса с такой большой скоростью — пока единственное имеющееся у нас спектроскопическое свидетельство того, что событие 2015b является сверхновой. Возможно, в спектре 16 мая 2015 г. [5] (за 6 дней до максимума) фрагмент этой эмиссии был отождествлен с He II 4686 Å. К тому же в описании того спектра не упоминаются сильные линии Fe II, которые видны во всех наших спектрах. Как правило, линии He II и Fe II не наблюдаются в спектрах одновременно из-за разницы потенциалов ионизации, при которых формируются эти линии, и, естественно, видны одни или другие в зависимости от температуры ионизирующего источника.

В случае радиально симметричного истечения вещества со скоростью 18000 км с^{-1} поглощающие и излучающие компоненты оболочки, движущиеся со скоростями менее 4000 км с^{-1} , были бы сметены этим веществом, или высокоскоростной газ испытал бы быстрое торможение. Тем не менее в спектре наблюдается столь необычный симбиоз свойств. Единственным объяснением такого симбиоза может быть осевая симметрия истечения при взрыве SN. То есть высокоскоростной газ

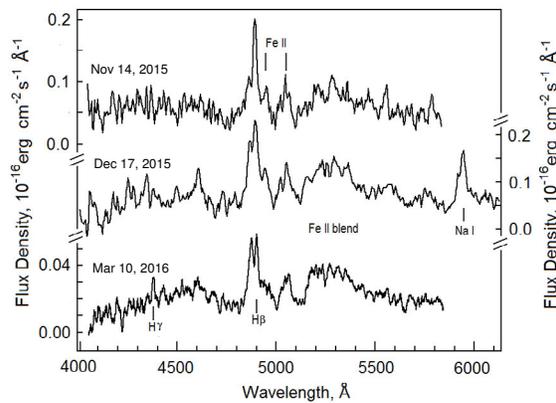


Рис. 4. Спектральные изменения SN 2015bh на вторичном спаде блеска.

был выброшен вдоль полярной оси, в то время как более медленное истечение происходило в экваториальных направлениях. Не исключено, что в экваториальной плоскости уже находился плотный газовый диск, который был сформирован на более ранней стадии эволюции или в фазе 2015a, и он воспрепятствовал распространению высокоскоростного газа в экваториальной плоскости. Например, спектрополяриметрия SN 2009ip в работе [22] в аналогичных фазах 2012a и 2012b во время ее вспышки в 2012 г. показала, что истечения в этих фазах были сильно несферическими, а углы плоскости поляризации — ортогональными. По мнению авторов работы [22] в случае 2009ip вещество выброса, образовавшегося при взрыве 2012a, в фазе 2012b в экваториальной плоскости сталкивалось со сплюсненной (тороидальной) структурой. Свидетельства биполярных выбросов при взрывах LBV встречаются нередко (это видно в профилях бальмеровских линий, например, в [23], или в биполярной структуре туманности «Нотункулус» вокруг галактической звезды типа LBV η Car). В случае SN 2015bh, вероятно, имел место «выстрел» высокоскоростного газа в сторону наблюдателя, связанный с фазой 2015b, в то время как противоположный выброс был перекрыт толщей экваториального диска или тороидальной структуры при относительно малом угле наклона этой структуры к лучу зрения.

Спектры объекта в синем и зеленом диапазонах, полученные в фазе 2015b после того, как он появился из-за Солнца, то есть на вторичном спаде блеска (176–374 день после максимума блеска), показаны на рис. 4, а полный спектр на 209-й день — на рис. 3 (внизу). В синих спектрах видно усиление коротковолнового эмиссионного компонента в профилях линии H β , который появился на месте абсорбционного компонента, наблюдавшегося около максимума блеска. Эмиссионные

¹¹<http://jet.sao.ru/~bars/spectra/v496sct/>

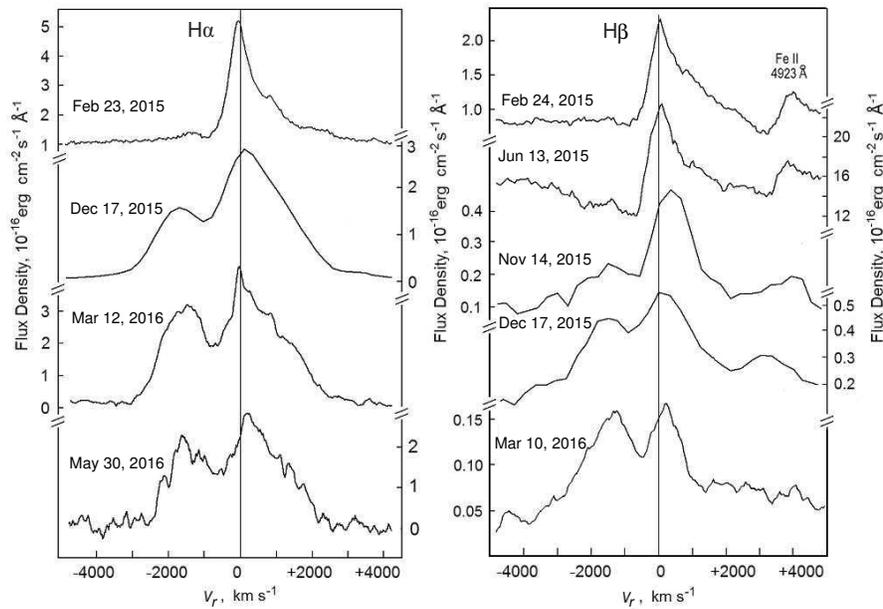


Рис. 5. Профили спектральных линий $H\alpha$ и $H\beta$ и их изменения со временем (сверху вниз).

компоненты нарастали в этой же части профилей линий Fe II, в результате чего образовались протяженные бленды в районе $4400\text{--}4700\text{ \AA}$ и $5150\text{--}5450\text{ \AA}$. Если бы не было сильных линий водорода, такой спектр был похож на спектры SN Ic 1994I, 2003jd, 2010gx, 2004aw (рис. 4 в [24]).

Изменения в профилях линий $H\alpha$ и $H\beta$ показаны на рис. 5. Здесь спектры в декабре 2015 г. были сделаны с низким спектральным разрешением. 13 июня 2015 г. в профиле $H\beta$ виден абсорбционный компонент, распространяющийся в коротковолновую сторону от -400 до -4000 км с^{-1} . Этот диапазон скоростей в профилях $H\alpha$ и $H\beta$ постепенно наполняется эмиссией. В профиле $H\beta$ 10 марта 2016 г. мы уже видим сильный эмиссионный компонент с максимумом на -1300 км с^{-1} . Этот же компонент в $H\alpha$ 12 марта 2016 г. распространялся до скорости -3500 км с^{-1} . В спектре 30 мая 2016 г. континуум уже ниже уровня шума, но профиль эмиссии $H\alpha$ остается тем же эмиссионным и сохраняет двойную структуру.

Подобное поведение было описано на поздних стадиях кривой блеска у массивной красной новой NGC 4490-OT2011 [19]. Некоторое отличие от события 2015bh состояло в меньшем диапазоне скоростей абсорбционного компонента, от 0 до -650 км с^{-1} , так что не все коротковолновое крыло профиля $H\alpha$ было перекрыто абсорбцией, и на -650 км с^{-1} наблюдался эмиссионный горб. Эта скорость в 4–5 раз меньше, чем у SN 2015bh. В [19] дано вполне правдоподобное объяснение

такой эволюции профиля: «с такими скоростями была выброшена массивная оболочка, которая была видна сначала в абсорбции, но по мере остывания расположенной под ней фотосферы (что следовало из спектральной эволюции во время спада после пика блеска) и при падении оптической глубины та же плотная оболочка стала видна в эмиссии $H\alpha$. Возможно, это указывает на выходящую наружу ударную волну, которая разогрела выброшенную оболочку.» Для объяснения перехода от абсорбции к эмиссии у 2015bh следует добавить быстрое расширение выброшенной оболочки (v_r до 4000 км с^{-1}), в результате которого она вскоре стала оптически тонкой. Авторы [19] интерпретировали событие NGC 4490-OT2011 как красную новую — слияние компонентов массивной системы. Оболочки красных новых, как правило, вообще не переходят в оптически тонкую фазу, а если и переходят, то это оказывается холодный неионизованный и даже молекулярный газ, как у V4332 Sgr. Отметим, что кривая блеска NGC 4490-OT2011 имела два максимума, и достигла во второй вспышке (со спектром холодной звезды) рекордной абсолютной величины -14^m . При слиянии ядер массивных звезд формируется ударная волна, и при выходе ударной волны наблюдается первый максимум блеска (пример — RN 2015/M 101, тоже массивная система [25]).

4.3. Предшественник вспышки

Звездный объект, который ранее был отождествлен с SN 2015bh, 6 марта 2008 г. по на-

шим измерениям снимка Gemini имел блеск $g = 25.^m4 \pm 0.^m15$ и $r = 25.^m0 \pm 0.^m2$ в фильтрах SDSS в системе AB 95 [16]. Эти величины соответствуют $V = 25.^m2$. С учетом определенного нами общего поглощения это соответствует абсолютной величине $M_V = -8.^m3 \pm 0.^m3$. В фильтре $i + H_\alpha$ звезда была значительно ярче, $23.^m3 \pm 0.^m2$. Эти оценки близки к пределу Хэмфрис-Дэвидсона [26] для наиболее массивных звезд и подтверждают классификацию предшественника как LBV. Звезды столь высокой светимости нестабильны, теряют массу и формируют богатую газовой-пылевой околосреду.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Связь импосторов SN с LBV установлена довольно надежно. Некоторые SN IIp также явно связаны с LBV. Конкретные свидетельства этих связей подробнее рассмотрены в [27] и в цитируемых там исследованиях. Однако известно всего четыре импостора, вспышки которых привели к появлению SN IIp. Кроме упоминавшегося ранее события 2009ip, это 2010mc [28], 2011ht [29] и LSQ13zm [27]. SN 2015bh демонстрирует определенное сходство с этими объектами, однако есть различия как в кривых блеска, так и в спектрах. Природа взрывов LBV, которые приводят к еще большему по масштабам взрывам SN, остается пока неясной, хотя есть несколько гипотез, объясняющих это явление.

Гипотеза 1. PPI — «пульсационная парная нестабильность», связанная с массовым образованием электрон-позитронных пар в ядрах массивных горячих звезд, в результате которой происходит падение лучевого давления, неполный коллапс звезды и термоядерный взрыв. Термоядерный взрыв останавливает коллапс, и при этом происходит сброс оболочки. Повторная вспышка в этом случае объясняется взаимодействием сброшенной оболочки с плотной околосредой [30]. Подробный обзор конечных стадий эволюции и механизмов сверхновых у массивных звезд содержится в [31]. Установлено, что при взаимодействии сброшенной с большой скоростью оболочки с плотной околосредой выделяется не меньше тепловой энергии, чем при коллапсе ядра.

Заметим, что механизм PPI действует для звезд с исходными массами в пределах $80\text{--}280M_\odot$ и может вызывать повторные вспышки импостора, подобно случаю SN 2009ip, а в конечном счете приведет либо к коллапсу ядра и образованию черной дыры, либо к полному разрушению звезды (при фотодезинтеграции никеля для массы в диапазоне $130\text{--}280M_\odot$).

Могут ли обнаруженные нами спектральные сходства SN 2015bh с классическими новыми типа

Fe II во вспышках истолкованы в пользу этой гипотезы?

Классические новые — это катаклизмические или симбиотические системы, содержащие далеко проэволюционировавшую звезду — белый карлик и спутник — красный карлик или красный гигант (донор аккреции). Известно, что вспышка новой — это термоядерный взрыв на поверхности белого карлика водородной оболочки, накопившейся в результате аккреции.

По спектрам классические новые относятся к одному из двух типов, He/N и Fe II, либо они бывают «гибридными» — с переходом от Fe II к He/N при вспышке. Р. Вильямс [20] объясняет эти различия формированием спектров в разных источниках в двойной системе (белый карлик, вторичный компонент, оболочка, аккреционный диск). Новые типа He/N имеют в спектрах очень широкие эмиссионные линии (большая скорость выброса) элементов более высокой степени ионизации с прямоугольными профилями и почти всегда без абсорбционных компонентов, а это значит, что газ выброшен при термоядерном взрыве прямо из белого карлика. Для спектров новых типа Fe II на начальном спаде кривой блеска характерны многочисленные линии Fe II низкой степени ионизации, которые возбуждены столкновениями атомов, хотя в далеком красном диапазоне есть линии элементов CNO, возбуждаемые при рекомбинации и флуоресценции ударной волной, возникающей при орбитальном движении. Профили этих линий более узкие и закругленной формы, причем часто имеют абсорбционные детали типа P Cyg, характерные для расширяющихся оптически толстых газовых оболочек. Интенсивности эмиссий Fe II убывают при падении блеска относительно медленно и при этом часто нарастают снова при эпизодах «вторичных максимумов» через месяцы после начала вспышки. На раннем спаде блеска часто наблюдаются узкие абсорбции тяжелых элементов железного пика. То есть спектр формируется в газовой оболочке с содержанием элементов, близким к солнечному. В максимуме блеска и во вторичных максимумах на спаде блеска излучающий газ более холодный, чем в других фазах. Вильямс [20] считает, что этот газ происходит скорее из вторичного компонента — нормальной звезды, чем из белого карлика. Вероятно, он даже не смешан с веществом, выброшенным при вспышке, а насыщен тяжелыми элементами, образовавшимися в ходе эволюции вторичной звезды. Гидродинамические расчеты показывают, что сброшенное с белого карлика вещество и излучение взрыва стимулируют вторичный компонент к потере массы через точки Лагранжа L1 и L3, а ударная волна от орбитального движения и аккреционного диска формирует

из потерянного вторичным компонентом газа околозвездную оболочку. В то же время установлено, что гибридные новые развиваются лишь из новых типа Fe IIb (с широкими линиями в спектре), но не с Fe IIп (с узкими линиями). С учетом обнаруженного нами спектрального сходства SN 2015bh с классическими новыми типа Fe II можно привести следующие аргументы против гипотезы 1.

(а) Гипотеза PPI не предполагает присутствия компонента в двойной системе. Однако из наблюдаемого спектра SN 2015bh следует, что содержание элементов в оболочке и в звездном ветре при вспышке будет близко к солнечному или лишь слегка проэволюционирует. Как и у классических новых типа Fe II, это вещество может иметь аккреционное происхождение со вторичного компонента.

(б) В рамках этой гипотезы событие PPI и термоядерный взрыв объясняют фазу 2015a, а преобразование кинетической энергии выброса в излучение при взаимодействии с околозвездной средой — фазу 2015b. Фотометрические и спектральные признаки SN в фазе 2015b, отмеченные нами ранее, предполагают полный коллапс ядра, что противоречит гипотезе PPI.

(в) Время распространения волны внутри сброшенной при 2015a оболочки можно оценить как промежуток между концом фазы 2015a (начало падения блеска в момент JD 2457138, $m_{\text{ag}} = 18^{\text{m}}6$ по наблюдениям Ховертона) и пиком вспышки в фазе 2015b JD 2457165, $V = 15^{\text{m}}35$. Это 27 дней. Такой срок очень велик для распространения динамических изменений, но типичен для переноса тепла и излучения в массивных оболочках (у красных новых высокой светимости).

Гипотеза 2. Коллапс ядра слабой сверхновой и взаимодействие выброса со средой [6]. В рамках гипотезы фаза 2015a трактуется как вспышка SN IIP, а фаза 2015b — как взаимодействие выброса с окружающей средой. Примеры слабых SN IIP с коллапсом ядра, в максимуме блеска достигавших абсолютной величины -14^{m} , 1999bg и 2010id, приведены в [27]. У SN 2015bh в фазе 2015a нет никаких свидетельств вспышки сверхновой, хотя в фазе 2015b есть — темп вторичного спада на кривой блеска, совпадающий с расчетным при распаде кобальта-56, эмиссия в линии H β со скоростью до 18 000 км с $^{-1}$. Это аргументы против гипотезы о слабой SN.

Гипотеза 3. Повторные вспышки, связанные со сближением и взаимодействием компонентов на эллиптических орбитах в двойной системе, а затем окончательная вспышка при слиянии или прямом столкновении. В [32] для SN 2009ip, у которой наблюдалось несколько вспышек импостора перед вспышкой сверхновой, а также горбы на

спаде ее блеска, рассматривался вариант проэволюционировавшей звезды массой 60–100 M_{\odot} в системе со звездой массой 12–50 M_{\odot} . У нас для события 2015bh нет таких аргументов — ни повторных вспышек импостора, ни горбов на спаде блеска при вспышке 2015b, хотя К. Тёне (Christine Thöne) и коллеги обнаружили «кратковременные перемены по крайней мере за 21 год» до событий 2015 г. [33]. Слияние компонентов даже у массивных звезд приводит к феномену красной новой — холодному взрыву, однако спектральных свидетельств красной новой в фазе 2015b у нас нет.

Гипотеза 4. Последний взрыв LBV (импостор SN), за которым последовал коллапс ядра LBV (SN IIп) [27]. Причиной взрыва импостора можно считать событие PPI, которое спровоцировало коллапс массивного ядра LBV на поздней стадии эволюции этой звезды. Свидетельством поздней стадии эволюции LBV могут служить необычно сильные линии железа. Железо могло попасть в оболочку звезды в результате перемешивания. Это одна из перспективных гипотез. От гипотезы 1 она отличается тем, что основной максимум объясняется коллапсом ядра, а не взаимодействием выброшенного газа с окружающей средой. В этом случае остатком взрыва будет одиночная черная дыра.

Эти гипотезы подробно рассматривались в работе [27]. Мы считаем возможным еще один сценарий.

Гипотеза 5. Слияние компонентов массивной системы с формированием общей оболочки и коллапс ядра одной из звезд, находящейся в поздней стадии эволюции, из-за превышения критической массы (несостоявшаяся красная новая в массивной двойной системе). При этом процесс слияния звезд может и не закончиться слиянием их ядер, и тогда после взрыва SN останется двойная система: оптический остаток спутника — донора аккреции + компактный компонент. Примеры массивных систем с компонентами типа LBV существуют. В известной галактической системе η Car, на орбите вокруг LBV находится O-звезда раннего или среднего подкласса с массой в пределах 30–60 M_{\odot} , прошедшая меньший путь эволюции, чем главный более массивный компонент [34].

Перед вспышкой 2015b наблюдался постепенный подъем блеска звезд в фазе 2015a, который закончился спадом на 1 $^{\text{m}}$. Фазу 2015a обычно называют импостором, но кривые блеска импосторов не показывают постепенный подъем блеска во время вспышек, а, наоборот, показывают спад, характерный для SN (кроме, может быть, SN 1954J). Такой подъем блеска типичен для красных новых и связан с формированием

общей оболочки при слиянии. Подобный эффект наблюдался у красных новых V4332 Sgr, V1309 Sco, RN 2015/M 31 (M 31N 2015-01a) и RN 2015/M 101 (но отсутствовал у V838 Mon). Спад блеска перед вспышкой красной новой на 1^m за год до максимума наблюдался у V1309 Sco. В [35] этот спад объясняют слиянием ядер звезд и медленным толчком из центра звезды, в результате которого оболочка переходит в режим расширения, близкий к адиабатическому. В результате происходит продолжительное ослабление блеска звезды. Термин «медленный толчок» (slow shock) был впервые использован П. Мартини и коллегами (P. Martini et al. [36]) для объяснения феномена красной новой у V4332 Sgr. У массивных красных новых NGC 4490-OT2011 [19] и RN 2015/M 101 [25] при слиянии ядер звезд сформировалась ударная волна, после выхода которой на поверхность оболочка все-таки перешла в режим адиабатического расширения, о чем свидетельствует глубокое ослабление блеска перед вторичным максимумом, в котором звезда имела спектр позднего типа. До сих пор в стадии формирования оболочки красных новых не получено ни одного спектра, и, наиболее вероятно, они не похожи на спектры классических новых типа Fe II. Такой спектр SN 2015bh в фазе 2015a можно объяснить аккрецией богатого водородом вещества со спутника при формировании общей оболочки на проэволюционировавшую звезду (LBV), развитием термоядерного горения в слое и выделением дополнительной энергии в результате аккреции. При высокой светимости, превышающей эддингтоновский предел, происходит истечение массы со скоростью, характерной для классических новых звезд во вспышках. При слиянии звезд момент количества движения уносится через точку Лагранжа L2, в результате чего формируется диск, окружающий систему. Однако можно ожидать и формирование толстого диска вокруг массивной звезды внутри общей оболочки. В некоторый момент при превышении критической массы произошел коллапс ядра проэволюционировавшей звезды, и в таких условиях взрыв был сферически несимметричным с высокоскоростными выбросами в направлении оси внутреннего диска. Асимметрия истечения при формировании общей оболочки, а также асимметрия выброса при коллапсе ядра могут быть связаны с аккрецией. В конкретном случае SN 2015bh мы наблюдали падение блеска в конце фазы 2015a, то есть медленный толчок уже произошел, и началось адиабатическое расширение оболочки. Коллапс ядра прекратил адиабатическое расширение оболочки и прервал развитие событий по сценарию красной новой. Поэтому прерванный сценарий можно назвать «несостоявшейся красной новой». Распространение ударной волны внутри

общей оболочки и выход ее на поверхность может объяснить кривую блеска в фазе 2015b с высокой светимостью и резким пиком в максимуме, а также высокую температуру на спаде вспышки 2015b (в отличие от красных новых) и переход оболочки в оптически тонкое состояние. В пользу гипотезы 5 свидетельствует обилие водорода в спектре 2015bh, источником которого может быть оболочка спутника, прошедшего меньший путь эволюции. Эта гипотеза предсказывает остаток взрыва в виде двойной системы с релятивистским компонентом, если коллапс произошел раньше, чем полное слияние ядер.

Последняя гипотеза объясняет события, проявившиеся на кривой блеска и в спектре звезды, в деталях. Однако некоторые эпизоды сценария (высокоскоростной выброс в профиле H β , падение блеска с переходом оболочки в режим адиабатического расширения) основаны на одиночных наблюдениях и требуют подтверждения. Открытым остается вопрос, может ли уже расширяющаяся оболочка при толчке изнутри перейти в адиабатический режим? Для ответа на него нужны динамические расчеты. Проверки требует наблюдение Жиян Су и Синг Гао кратковременной вспышки 7 апреля 2015 г, которая может быть связана с выходом первичной, более слабой, ударной волны. Вопрос о том, является ли событие 2015bh конечной точкой в эволюции массивной звезды, также пока не решен. Ответ даст исследование остатка взрыва с большими телескопами на уровне звездных величин слабее 25^m.

От выбора сценария зависит, является ли сверхновая окончательной фазой эволюции массивной звезды с образованием компактного объекта или одиночным событием в истории LBV. Наблюдения остатков подобных двойных взрывов должны это прояснить. Некоторые случаи (например, LSQ13zm) были открыты как SN II_p, но затем по архивным данным обнаружилась их связь с импосторами. Не связаны ли все вспышки SN типа II_p с предшествовавшими взрывами LBV? Этот вопрос также требует специальных исследований.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектры оптического транзиента 2015bh/NGC 2770 в фазах импостора и сверхновой, полученные на БТА/SCORPIO, необычны и похожи на спектры классических новых типа Fe II по Вильямсу. По спектральным данным установлено, что в фазе импостора (2015a) сформировалась оптически толстая расширяющаяся оболочка, по которой в фазе SN (2015b) прошла ударная волна. В конечном счете оболочка получила ускорение и перешла в оптически тонкую фазу. Кроме того

в профилях спектральных линий обнаружены абсорбционные компоненты протяженной околозвездной среды, часть которой была ускорена световым давлением при вспышке SN. В спектре SN в профиле линии $H\beta$ вблизи максимума блеска обнаружен эмиссионный компонент выброса со скоростью $18\,000\text{ км с}^{-1}$, наблюдающийся одновременно с компонентами оболочки, ускоренной до $4\,000\text{ км с}^{-1}$, что свидетельствует об асимметричном взрыве. Кривая блеска похожа на кривые блеска SN III, а скорость вторичного спада блеска соответствует скоростям, обусловленным радиоактивным распадом изотопа ^{56}Co . В пике вспышки SN достигла абсолютной величины $M_V = -18^m 14 \pm 0^m 30$.

Предшественником SN 2015bh является голубая переменная звезда высокой светимости (LBV) с сильной эмиссией $H\alpha$, одна из ярчайших звезд галактики NGC 2770.

Наиболее вероятной гипотезой для SN 2015bh мы считаем коллапс ядра более массивной звезды в двойной системе при слиянии с менее массивным спутником (не состоявшаяся красная новая в массивной двойной системе). Рассмотрены и другие гипотезы. Коллапс ядра одиночной массивной звезды, спровоцированный событием PPI, также возможен.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе были использованы базы данных Sloan Digital Sky Survey, NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), сайт-хостинг изображений Flickr.com, базы данных по сверхновым звездам RochesterAstronomy и ГАИШ МГУ. Спектральные и фотометрические наблюдения, проводившиеся в CAO РАН, а также их обработка и анализ финансировались грантом Российского научного фонда №14–50–00043. Работа российского 6-м телескопа БТА осуществляется при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ. 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 за поддержку грант РФФИ 16–02–0758. Работа Д.Ю.Ц. была частично поддержана грантом РНФ 16–12–10519. Работа И.М.В. выполнена при частичной поддержке стипендии Словацкого информационного агентства SAIA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Elias-Rosa, S. Benetti, L. Tomasella, et al., *Astronomer's Telegram* № 7042 (2015).
2. S. D. Van Dyk, D. Schuyler, C. Y. Peng, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112**, 1532 (2000).
3. A. de Ugarte Postigo, G. Leloudas, C. C. Thöne, et al., *Astronomer's Telegram* № 7409 (2015).
4. A. de Ugarte Postigo, C. C. Thöne, G. Leloudas, F. Aceituno, *Astronomer's Telegram* № 7514 (2015).
5. G. Duggan, E. Bellm, G. Leloudas, et al., *Astronomer's Telegram* № 7515 (2015).
6. J. C. Mauerhan, N. Smith, A. V. Filippenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **430**, 1801 (2013).
7. R. Margutti, D. Milisavljevic, A. M. Soderberg, et al., *Astrophys. J.* **780**, 21 (2014).
8. M. L. Graham, D. J. Sand, S. Valenti, et al., *Astrophys. J.* **787**, 163 (2014).
9. A. Pastorello, E. Cappellaro, C. Inserra, et al., *Astrophys. J.* **767**, 1 (2013).
10. S. Campana, C. C. Thöne, G. Leloudas, et al., *Astronomer's Telegram* № 7517 (2015).
11. J. Vinko, K. Sarneczky, and K. Vida, *Astronomer's Telegram* № 7541 (2015).
12. N. Richardson and E. Artigau, *Astronomer's Telegram* № 7543 (2015).
13. C. C. Thöne, M. J. Michalowski, G. Leloudas, et al., *Astrophys. J.* **698**, 1307 (2009).
14. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
15. M. Modjaz, W. Li, N. Butler, et al., *Astrophys. J.* **702**, 226 (2009).
16. M. Fukugita, T. Ichikawa, J. E. Gunn, et al., *Astron. J.* **111**, 1748 (1996).
17. J. B. Oke, *Astron. J.* **99**, 1621 (1990).
18. J. P. Anderson, S. González-Gaitán, M. Hamuy, et al., *Astrophys. J.* **786**, 67 (2014).
19. N. Smith, J. E. Andrews, S. D. van Dyk, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **458**, 950 (2016).
20. R. Williams, *Astron. J.* **144**, 98 (2012).
21. R. M. Humphreys and J. C. Martin, in *Eta Carinae and the Supernova Impostors*, ed. by K. Davidson and R. M. Humphreys (Springer, New York, 2012), p. 1.
22. J. Mauerhan, G. G. Williams, N. Smith, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **442**, 1166 (2014).
23. E. A. Barsukova, V. P. Goranskij, A. F. Valeev, and S. S. Kaisin, *Variable Stars* **34**, № 4, P. 1 (2014).
24. A. Pastorello, S. J. Smartt, M. T. Botticella, et al., *Astrophys. J.* **724**, L16 (2010).
25. V. P. Goranskij, E. A. Barsukova, O. I. Spiridonova, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 82 (2016).
26. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Astrophys. J.* **232**, 409 (1979).
27. L. Tartaglia, A. Pastorello, M. Sullivan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 1039 (2016).
28. N. Smith, J. C. Mauerhan, and J. L. Prieto, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **438**, 1191 (2014).
29. M. Fraser, M. Magee, R. Kotak, et al., *Astrophys. J.* **779**, L8 (2013).
30. S. E. Woosley, S. Blinnikov, and A. Heger, *Nature* **450**, 390 (2007).
31. A. Heger, in *Eta Carinae and the Supernovae Impostors*, ed. by K. Davidson and R. M. Humphreys (Springer, New York, 2012), p. 299.

32. N. Soker and A. Kashi, *Astrophys. J.* **764**, L6 (2013).
33. C. Thöne, A. de Ugarte Postigo, G. Leloudas, et al., in *Frontiers of Massive-Star Evolution and Core-Collapse Supernovae, Symposium S16 at EWASS 2016*, Paper №1133.
34. M. F. Corcoran and K. Ishibashi, in *Eta Carinae and the Supernova Impostors*, ed. by K. Davidson and R. M. Humphreys (Springer, New York, 2012), p. 195.
35. E. A. Barsukova, V. P. Goranskij, A. F. Valeev, and A. V. Zharova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 67 (2014).
36. P. Martini, R. M. Wagner, A. Tomaney, et al., *Astrophys. J.* **118**, 1034 (1999).

ДОПОЛНЕНИЕ ОТ 18 ИЮЛЯ 2016 г.

В докладе К. Тёне (Christine Thöne) и др. на Симпозиуме S16 на EWASS-2016 в Афинах (Греция) [33] содержалась следующая важная информация о SN 2015bh в NGC 2770. В ноябре 2013 г. Паломарской фабрикой транзиентов была открыта вспышка этой звезды, получившая обозначение PTF13evf, при которой она достигла абсолютной величины $M(AB) = -12^m.5$. Тогда сообщение о вспышке не было опубликовано. Звезда находилась в активном состоянии еще с 1994 г. с переменностью абсолютной величины $M(AB)$ в пределах от $-9^m.5$ до -12^m . Широкая эмиссия, распространяющаяся в коротковолновую сторону от H β на 18 000 км с $^{-1}$, наблюдалась в этой работе в 4-х спектрах в период 17.9–26.9 дней после максимума и была отождествлена авторами работы как бленда Боуэна C III + N III.

SN 2015bh in NGC 2770: LBV Core Collapse in Merging of Binary System Components

V. P. Goranskij, E. A. Barsukova, A. F. Valeev, D. Yu. Tsvetkov, I. M. Volkov, V. G. Metlov, and A. V. Zharova

We present spectroscopy and multicolor photometry for the optical transient PSN J09093496+3307204 in the galaxy NGC 2770, which has afterwards been transferred into the supernova phase and got the name SN 2015bh. Medium-resolution spectral observations were carried out between February 2015 to May 2016 using the focal reducer SCORPIO at the 6-m Russian telescope BTA. They were followed by photometric observations at the BTA and six other telescopes with 0.5–1 m apertures. Both at the phase of the SN impostor (2015a) and at the supernova phase (2015b), besides Balmer emissions, the strong Fe II emissions are seen in the spectrum; so, these spectra resemble those of Williams Fe II type classical novae. Taking into account circumstellar, interstellar and galactic absorption, $A_V = 1^m.14 \pm 0^m.15$, we determined maximum absolute magnitudes of the object to be $M_V = -15^m.0 \pm 0^m.3$ at the 2015a phase and of $M_V = -18^m.14 \pm 0^m.30$ at the 2015b phase. The light curve at the 2015b phase is similar to those of SN IIL. The supernova progenitor is a luminous blue variable (LBV) star with the powerful H α emission. We consider several hypotheses of supernovae explosions following optical transients related with LBV. The hypothesis of core collapse of an evolved massive star interrupting the process of its merging with massive companion in a binary system (a failed luminous red nova) was chosen as the preferable one for this event.

Keywords: *supernovae: general—novae, cataclysmic variables—supernovae: individual: SN 2015bh, PSN J09093496+3307204*