

## СВЕРХНОВАЯ ТИПА II-P SN 2018aоq В NGC 4151: КРИВЫЕ БЛЕСКА, МОДЕЛИ И РАССТОЯНИЕ

© 2021 г. Д. Ю. Цветков<sup>1\*</sup>, Н. Н. Павлюк<sup>1</sup>, О. В. Возякова<sup>1</sup>,  
Н. И. Шатский<sup>1</sup>, А. М. Татарников<sup>1</sup>, А. А. Никифорова<sup>2,3</sup>, П. В. Бакланов<sup>4,5</sup>,  
С. И. Блинников<sup>4,1</sup>, М. Г. Ушакова<sup>1,4</sup>, Е. Г. Ларионова<sup>3</sup>, Г. А. Борман<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Астрономический институт Санкт-Петербургского государственного университета,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>НИЦ “Курчатовский институт” – ИТЭФ, Москва, Россия

<sup>5</sup>Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва, Россия

<sup>6</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

Поступила в редакцию 26.02.2021 г.

После доработки 30.03.2021 г.; принята к публикации 30.03.2021 г.

Представлены результаты *UBVR/ИК* фотометрии сверхновой типа II-P SN 2018aоq в NGC 4151, полученные за период с 4 апреля 2018 г. по 14 января 2019 г. на нескольких телескопах, в том числе на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Определены основные параметры кривых блеска. Осуществлено сравнение кривых блеска и цвета SN 2018aоq и нескольких хорошо исследованных SNe II-P. Показано, что по максимальной светимости SN 2018aоq занимает промежуточное положение между SNe II-P с нормальной и пониженной светимостью. Выполнено радиационно-гидродинамическое моделирование кривых блеска и скоростей расширяющейся оболочки сверхновой SN 2018aоq с помощью кода STELLA. Наилучшее согласие с наблюдениями получено для моделей предсверхновой с массой выброса  $M = 14\text{--}19 M_{\odot}$ , массой радиоактивного  $^{56}\text{Ni}$ , составляющей  $M_{^{56}\text{Ni}} = 0.01 M_{\odot}$ , энергией взрыва  $E = (0.4\text{--}0.6) \times 10^{51}$  эрг, при металличности  $Z = 0.1 Z_{\odot}$ . Радиус предсверхновой зависит от принимаемого расстояния  $D$  до NGC 4151 и его значения соответствуют  $R_0 = 500 R_{\odot}$  при  $D = 20$  Мпк и  $R_0 = 400 R_{\odot}$  при  $D = 16$  Мпк.

*Ключевые слова:* сверхновые — SN 2018aоq.

DOI: 10.31857/S0320010821050089

### ВВЕДЕНИЕ

Сверхновые (SNe) типа II являются самыми распространенными из сверхновых, вспышка которых обусловлена коллапсом звезд с массами, превышающими  $\sim 8 M_{\odot}$ . Среди них выделяются SNe типа II-P, светимость которых остается почти постоянной на протяжении 80–120 сут. Исследования мест вспышек позволили идентифицировать предсверхновые и показали, что как SNe II-P вспыхивают красные сверхгиганты с начальными массами от 8 до  $\sim 17 M_{\odot}$  (Смартт и др., 2009; Смартт, 2015). Верхняя оценка масс предсверхновых  $\sim 17 M_{\odot}$  значительно ниже предельного значения  $\sim 25 M_{\odot}$ , получаемого из гидродинамического

моделирования при воспроизведении кривых блеска и наблюдаемых скоростей расширяющихся оболочек сверхновых (Утробин, Чугай, 2009; Цветков и др., 2018; Никифорова и др., 2021).

Это противоречие до сих пор является нерешенной проблемой (Утробин, Чугай, 2017). Поэтому детальные исследования параметров сверхновых и физики процесса взрыва представляют большой интерес.

Для SNe II был предложен ряд методов определения расстояний, таких как ЕРМ (Киришнер, Кван, 1974), SCM (Хамуи, Пинто 2002; Надёжин, 2003), DSM (Бакланов и др., 2013), что имеет важное значение для космологических исследований (см., например, Познански и др., 2009; Бакланов и др., 2021).

\*Электронный адрес: tsvetkov@sai.msu.su

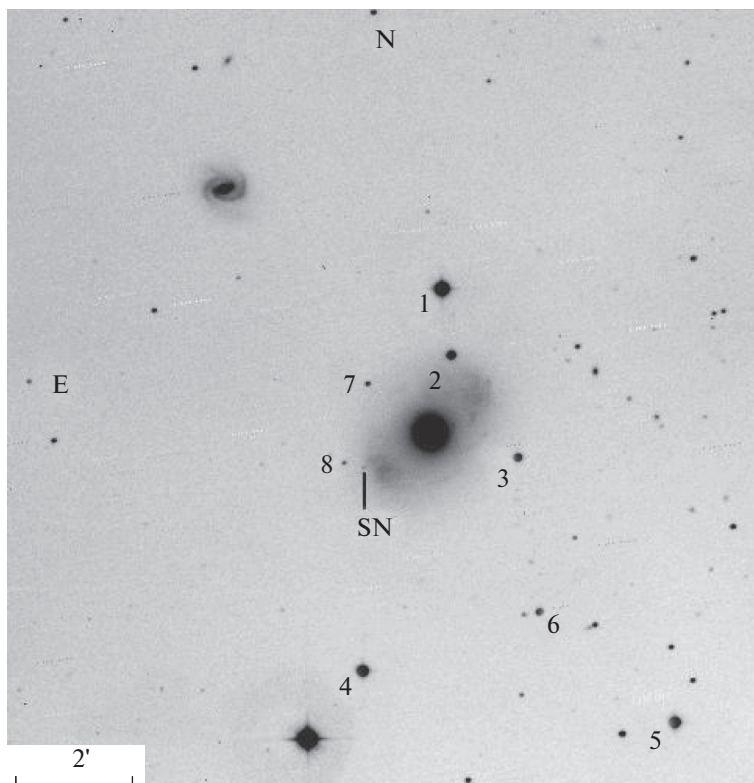


Рис. 1. Изображение SN 2018aof и звезд сравнения, полученное на телескопе С60 в фильтре *R*.

SN 2018aof была открыта 1 апреля 2018 г. при наблюдениях по программе поиска SN на Ликской обсерватории, ее блеск составлял  $15^m.3$ . Координаты SN:  $\alpha = 12^h 10^m 38^s.190$ ,  $\delta = +39^\circ 23' 47''.00$ , расстояние от центра NGC 4151:  $73''$ . Спектроскопические наблюдения, осуществленные на 1.5-м телескопе обсерватории Каната, показали, что SN принадлежит к типу  $\text{II}^1$ .

Фотометрические и спектроскопические наблюдения SN 2018aof с 5 апреля по 29 июля 2018 г. были осуществлены О'Нейлом и др. (2019). Они также обнаружили предсверхновую на изображениях, полученных космическим телескопом им. Хаббла и установили, что это красный сверхгигант спектрального типа M с параметрами  $\log(L/L_\odot) \sim 4.7$ ,  $T_{\text{eff}} \sim 3500$  K, который на главной последовательности имел массу  $\sim 10 M_\odot$ .

Наши наблюдения с 31 марта по 8 июля 2018 г. на шести обсерваториях представлены в работе Цветкова и др. (2019). В этой статье мы публикуем оптические наблюдения, продолжавшиеся до 12 января 2019 г., а также инфракрасные наблюдения, осуществленные на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ с 2 апреля 2018 г. до 21 января 2019 г.

Построены кривые блеска и цвета, включающие стадии падения блеска после плато и последующее линейное ослабление блеска. Данные наблюдений сравниваются с результатами моделирования с использованием многогруппового радиационно-гидродинамического численного кода STELLA.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрические наблюдения SN 2018aof, представленные в данной работе, продолжают серию наблюдений, результаты которых опубликованы Цветковым и др. (2019). Здесь мы представляем оптические наблюдения на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ (K250) (см. Потанин и др., 2017; Корнилов и др., 2014; Шатский и др., 2020), 60-см телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ (С60), 1-м телескопе Симеизской станции КрАО (S100), 0.4-м телескопе Астрономического института Санкт-Петербургского государственного университета (P40), 70-см телескопе КрАО (С70), инфракрасные наблюдения на 2.5-м телескопе КГО (K250).

Все телескопы, использовавшиеся для оптической фотометрии, были оснащены ПЗС-камерами и наборами *UBVRI* фильтров Джонсона–Кузинса.

<sup>1</sup><https://wis-tns.weizmann.ac.il/object/2018aof>

Таблица 1. *UBVRI*-величины звезд сравнения

Звезда	<i>U</i>	$\sigma_U$	<i>B</i>	$\sigma_B$	<i>V</i>	$\sigma_V$	<i>R</i>	$\sigma_R$	<i>I</i>	$\sigma_I$
1	13.24	0.03	12.47	0.02	11.45	0.02	10.92	0.02	10.44	0.03
2	14.50	0.05	14.47	0.03	13.82	0.03	13.42	0.03	13.08	0.03
3	—	—	15.08	0.04	14.38	0.03	13.99	0.03	13.66	0.03
4	15.61	0.04	14.01	0.02	12.77	0.02	12.10	0.02	11.50	0.02
5	13.45	0.03	13.21	0.02	12.55	0.02	12.18	0.02	11.85	0.02
6	16.10	0.06	15.84	0.04	15.08	0.03	14.64	0.03	14.37	0.03
7			18.40	0.06	17.21	0.05	16.35	0.05	15.84	0.04
8			18.11	0.07	17.63	0.06	17.35	0.06	17.03	0.06

Стандартная обработка и фотометрия осуществлялись с помощью пакета программ IRAF<sup>2</sup>. Звездные величины SN были получены апертурной или PSF-фотометрией относительно местных стандартов. ПЗС-изображение SN 2018aoq и звезд сравнения показано на рис. 1, величины звезд приведены в табл. 1. Величины звезд 1, 3, 4 опубликованы Цветковым и др. (2019), величины остальных звезд были определены привязкой к этим звездам.

Поверхностная яркость галактики в месте вспышки SN не очень высокая, однако она имеет существенный градиент. Для исключения влияния фона на результаты фотометрии проводилось вычитание изображений галактики из изображений с SN. Процедура вычитания осуществлялась согласно методике, описанной, например, Винко и др. (2006).

Фотометрия была приведена к стандартной системе Джонсона—Кузинса с помощью инструментальных цветовых уравнений, определенных по наблюдениям фотометрических стандартов. Фотометрия представлена в табл. 2, 3. Наблюдения на телескопе C70 проводились с двумя ПЗС-камерами: ST-7 и AP-7, в табл. 2 они обозначены как C70a, C70b.

*JHK* фотометрия SN 2018aoq была выполнена по кадрам, полученным в рамках осуществления программы наблюдений сейфертовской галактики NGC 4151 с помощью камеры ASTRONIRCAM (Наджиб и др., 2017), установленной на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ (К250). Наблюдения проводились в режиме дизеринга

(при этом между отдельными экспозициями телескоп смещается на несколько угловых секунд) с экспозициями от 2 до 15 с в зависимости от фильтра и величины атмосферного дрожания. Полученные изображения исправлялись за нелинейность и нормировались на кадр плоского поля. В качестве звезд сравнения использовались звезды 2MASS J12103076+3925374 и 2MASS J12102524+3923555 (звезды 2 и 3 на рис. 1), блеск которых в фотометрической системе МКО вычислялся на основе данных каталога 2MASS (Кутри и др., 2003) с использованием цветовых уравнений из работы Леггета и др. (2006):  $J = 12^m53$ ,  $H = 12^m21$ ,  $K = 12^m15$  и  $J = 13^m14$ ,  $H = 12^m91$ ,  $K = 12^m77$  соответственно. Результаты показаны в табл. 4. Точность оценок для наблюдений в период JD 2458211–275 составляет  $0^m03$ – $0^m05$  в фильтре *J*,  $0^m05$  в фильтре *H*,  $0^m07$ – $0^m08$  в фильтре *K*, для наблюдений после JD 2458470 точность около  $0^m1$ .

## РАССТОЯНИЕ ДО NGC 4151

В работе Цветкова и др. (2019) оценки расстояния до NGC 4151 получены с применением для SN 2018aoq методов ЕРМ (Киршнер, Кван, 1974) и SCM (Хамуи, Пинто, 2002), результаты:  $D_{\text{ЕРМ}} = 20.0 \pm 1.3$  и  $D_{\text{SCM}} = 16.4 \pm 1.5$  Мпк. Расчеты для метода ЕРМ проводились с использованием зависимости параметра диллюции  $\zeta$  от температуры согласно Дессарт, Хиллиер (2005). Расстояние  $D_{\text{ЕРМ}}$  хорошо согласуется с оценкой  $D = 19.0 \pm 2.5$  Мпк, основанной на сопоставлении размера излучающего в ИК-диапазоне пылевого тора, определенному по данным фотометрии и инфракрасной интерферометрии (Хениг и др., 2014). Был

<sup>2</sup>IRAF распространяется НОАО, управляемой AURA по соглашению с NSF.

Таблица 2. *BVR*-фотометрия SN 2018aoq

JD-2458000	<i>B</i>	$\sigma_B$	<i>V</i>	$\sigma_V$	<i>R</i>	$\sigma_R$	<i>I</i>	$\sigma_I$	Телескоп
213.42	15.30	0.04	15.43	0.04	15.23	0.08	15.22	0.05	K250
213.52	15.49	0.03	15.41	0.02	15.21	0.02	15.20	0.03	C70b
214.29	15.40	0.04	15.39	0.03	15.26	0.03	15.22	0.03	K250
215.47	15.47	0.05	15.38	0.04	15.26	0.03	15.19	0.03	K250
215.48	15.48	0.02	15.39	0.03	15.19	0.02	15.14	0.04	C70b
216.55	15.53	0.04	15.43	0.03	15.26	0.03	15.22	0.03	K250
217.49	15.56	0.02	15.42	0.02	15.19	0.02	15.16	0.03	C70b
218.42	15.58	0.03	15.48	0.03	15.26	0.03	15.22	0.03	K250
219.31			15.51	0.04	15.22	0.04	15.16	0.04	P40
219.43	15.51	0.03	15.51	0.03	15.25	0.04	15.18	0.04	C70a
220.40			15.55	0.03	15.24	0.05	15.22	0.05	P40
220.49	15.60	0.04	15.55	0.04	15.24	0.04	15.14	0.06	C70a
221.39	15.58	0.03	15.52	0.02	15.22	0.03	15.11	0.03	C70a
222.44	15.62	0.03	15.53	0.03	15.22	0.04	15.13	0.03	C70a
222.50			15.52	0.03	15.26	0.03	15.22	0.04	P40
223.49	15.64	0.03	15.51	0.02	15.23	0.03	15.10	0.03	C70a
225.47	15.74	0.03	15.53	0.02	15.21	0.02	15.09	0.03	C70a
228.54					15.25	0.04			P40
231.44			15.62	0.05	15.28	0.05	15.13	0.06	P40
231.49	16.17	0.02	15.63	0.02	15.30	0.02	15.19	0.03	C70b
233.49	16.18	0.04	15.67	0.03	15.31	0.03	15.14	0.03	C70a
236.43	16.39	0.07	15.71	0.03	15.36	0.03	15.21	0.04	K250
236.47	16.26	0.05	15.65	0.05	15.37	0.04	15.08	0.04	C70a
239.43	16.30	0.04	15.65	0.04	15.28	0.03	15.06	0.03	C70a
241.36	16.42	0.03	15.67	0.03	15.30	0.02	15.13	0.04	C70b
252.44	16.54	0.03	15.66	0.03	15.25	0.03	15.00	0.03	C70a
255.37	16.70	0.03	15.69	0.04	15.27	0.04	14.99	0.04	C70b
261.48	16.71	0.04	15.67	0.03	15.28	0.05	14.96	0.04	C70a
267.42	16.81	0.06	15.77	0.04	15.23	0.03	14.96	0.03	C70a
269.34	16.89	0.03	15.70	0.02	15.25	0.02	14.98	0.03	C70b
273.33	16.84	0.03	15.72	0.03	15.24	0.03	14.96	0.04	C70b
274.33	16.97	0.03	15.80	0.03	15.34	0.05	15.02	0.03	K250
278.42	16.93	0.08	15.77	0.04	15.27	0.07	14.95	0.05	C70a

Таблица 2. Окончание

JD–2458000	$B$	$\sigma_B$	$V$	$\sigma_V$	$R$	$\sigma_R$	$I$	$\sigma_I$	Телескоп
281.39	16.98	0.05	15.74	0.03	15.27	0.02	14.95	0.03	C70a
284.37	16.97	0.03	15.74	0.02	15.29	0.02	14.96	0.03	C70b
290.36	17.05	0.05	15.82	0.03	15.33	0.03	15.02	0.04	C70a
295.39	17.20	0.09	15.89	0.04	15.42	0.03	15.04	0.04	C70a
297.37	17.01	0.09	15.94	0.04	15.39	0.03	15.11	0.04	C70b
303.32	17.52	0.05	16.01	0.04	15.56	0.09	15.19	0.06	C70a
304.34	17.49	0.05	15.99	0.03	15.55	0.03	15.17	0.05	C70a
307.31	17.56	0.04	16.01	0.03	15.59	0.03	15.23	0.04	C70a
309.35	17.62	0.05	16.05	0.04	15.59	0.03	15.25	0.05	C70a
313.34	17.87	0.04	16.15	0.04	15.65	0.03	15.33	0.04	C70b
322.33			17.10	0.06	16.51	0.04	16.01	0.09	C70a
325.31					16.89	0.07			C70b
326.31					17.31	0.04			C70b
330.34					17.63	0.05			C70b
334.29					17.67	0.07			C70a
343.26					17.93	0.04			C70b
344.28					17.96	0.05			C70b
345.26					18.02	0.07	17.42	0.04	S100
361.23					18.14	0.06	17.56	0.06	C60
362.23			19.17	0.11	18.17	0.07	17.60	0.06	C60
381.18			19.63	0.09	18.39	0.08	17.96	0.06	K250
445.57			19.93	0.07	18.78	0.05			C60
448.52			20.10	0.13	18.93	0.07			C60
456.57	21.69	0.07	19.97	0.06	18.81	0.05	18.35	0.05	K250
487.49	21.82	0.09	20.29	0.07	19.20	0.06	18.80	0.05	K250
497.65			20.39	0.09	19.29	0.07	18.93	0.07	K250

сделан вывод, что метод ЕРМ для данной SN обеспечивает надежное определение расстояния. О’Нейлл и др. (2019) получили  $D_{\text{SCM}} = 18.2 \pm$

Таблица 3. Фотометрия SN 2018aoq в фильтре  $U$  на телескопе K250

JD–2458000	$U$	$\sigma_U$
215.47	14.60	0.05
216.55	14.68	0.05
218.42	14.83	0.05

$\pm 1.2$ , что также хорошо согласуется с оценкой Хенига и др. (2014). Однако в опубликованной недавно работе Юан и др. (2020) на основании исследования цефеид в NGC 4151 получена оценка  $D = 15.8 \pm 0.4$  Мпк, существенно меньшая приведенных выше оценок. Известно, что применение зависимости  $\zeta$  от  $T$ , установленной Истманом и др. (1996), дает меньшие значения расстояния, чем применение зависимости Дессарта, Хиллиера (2005). Мы провели расчет методом ЕРМ с зависимостью Истмана и др. (1996) и получили  $D_{\text{ЕРМ}} = 15.9 \pm 1.8$  Мпк, совпадающую с оценкой по цефеидам. Вполне возможно, что для разных SN реализуются различные зависимости  $\zeta$  от  $T$ , и

Таблица 4. Фотометрия SN 2018аоq в полосах *JHK* на телескопе K250

JD–2458000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	JD–2458000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>
211.56	15.71			227.40	14.86	14.79	14.60
213.39		15.26	14.89	233.34	14.85	14.77	14.56
213.39			14.96	235.32	14.84	14.73	14.55
213.46	15.19			236.33	14.82	14.71	
214.34	15.10	15.02	14.79	238.38	14.80	14.69	14.52
215.40	15.05	14.93	14.82	239.54	14.82	14.72	14.48
216.48	15.03	14.93	14.76	255.33	14.71	14.55	14.44
217.55	15.07	14.95	14.70	256.27	14.68	14.56	14.34
218.48	15.04	14.93	14.67	272.36	14.69	14.51	14.34
220.37	15.01	14.90	14.67	275.32	14.68	14.50	14.47
222.40	14.93	14.83	14.66	471.52	18.83	18.11	
225.24	14.89	14.83	14.60	473.48	18.92	18.21	
226.42	14.86	14.81	14.57	504.47	19.10		

для SN 2018аоq именно зависимость Истмана и др. (1996) является подходящей. Отметим также, что наша оценка  $D_{SCM}$  хорошо согласуется с результатами Юан и др. (2020).

Поскольку оценки расстояния до SN 2018аоq расходятся между собой, мы проводили моделирование сверхновой для двух расстояний в 16 и 20 Мпк, полученных в работах Хенига и др. (2014), Цветкова и др. (2019), Юан и др. (2020).

### КРИВЫЕ БЛЕСКА И ЦВЕТА

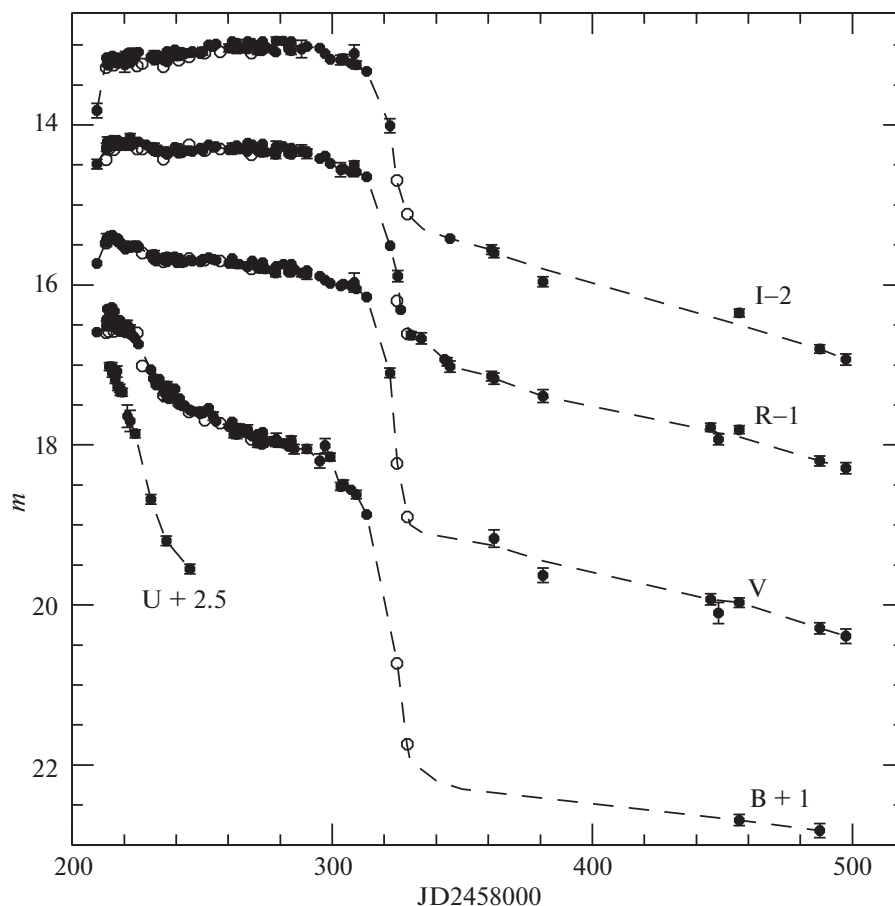
Кривые блеска SN 2018аоq в фильтрах *UBVRI* показаны на рис. 2. Вместе с нашими данными нанесены результаты О'Нейла и др. (2019), их величины *gri* переведены в *RI* с помощью соотношений из работы Чонис, Гаскелл (2008).

Результаты для всех телескопов достаточно хорошо согласуются. Кривые блеска типичны для SN II-P, плато продолжается около 100 сут. Наши первые наблюдения и верхние пределы, сообщенные Яманака и др. (2018) и О'Нейлом и

др. (2019), позволяют надежно определить максимальный блеск в полосах *B, V*:  $B_{\max} = 15^m35 \pm \pm 0^m1$ ,  $V_{\max} = 15^m37 \pm 0^m05$ , в этих полосах максимумы наступили практически одновременно при  $t_{\max} = \text{JD}2458215 \pm 2$ . В фильтре *R* блеск после выхода на плато оставался практически постоянным  $R_{\text{pl}} = 14^m22 \pm 0^m1$ , эта величина является и максимальным блеском в *R*, в полосе *I* блеск на плато слабо возрастал, достигнув максимума  $I_{\max} = 15^m0 \pm 0^m1$  около JD 2458270.

Быстрое падение блеска после плато началось около JD 2458310, линейный участок кривой блеска начался в JD 2458340 при блеске  $B = 21^m0$ ,  $V = 19^m0$ ,  $R = 18^m0$ ,  $I = 17^m4$ . Скорость падения блеска на линейном участке можно надежно установить только для фильтров *R, I*, она составляет 0.0087 и 0.0078 зв. величин  $\text{сут}^{-1}$  соответственно.

Инфракрасные кривые блеска в диапазонах *JHK* показаны на рис. 3. Блеск растет до фазы, соответствующей середине плато, и достигает максимальных значений  $J_{\max} = 14^m7$ ,  $H_{\max} = 14^m5$ ,  $K_{\max} = 14^m35$ . К сожалению, отсутствуют



**Рис. 2.** Кривые блеска SN 2018aоq в фильтрах *UBVRI*. Точки — наши данные, кружки — результаты О’Нейлл и др. (2019). Штриховые линии соединяют точки в каждом фильтре.

наблюдения на второй половине плато и переходе от плато к линейному падению блеска.

На рис. 4 показана кривая блеска SN 2018aоq в абсолютных *R*-величинах, она сравнивается с данными для пяти хорошо исследованных SN II-P с различной максимальной светимостью: 2005cs, 2008ip, 2009N, 2013am, 2017eaw (Цветков и др., 2006; Пасторелло и др., 2009; Рой и др., 2011; Такатс и др., 2014; Жанг и др., 2014; Цветков и др., 2018; Бута, Киил, 2019; Шалаи и др., 2019).

Для SN 2018aоq приняты расстояние 16 Мпк и избыток цвета  $E(B - V) = 0^m.04$  (О’Нейлл и др., 2019). При расстоянии 20 Мпк абсолютные величины будут ярче на  $0^m.5$ , что практически не влияет на дальнейшие выводы о сравнении кривых блеска SNe II-P. По абсолютной величине на плато SN 2018aоq занимает промежуточное положение между SNe II-P с нормальной светимостью (типичный объект SN 2017eaw) и SNe II-P с пониженной светимостью (SN 2005cs). SN 2018aоq похожа на SNe 2009N, 2013am, а наибольшее сходство демонстрирует с SN 2008ip.

Кривая блеска SN 2018aоq в абсолютных *J*-величинах показана на рис. 5, она сравнивается с кривыми для четырех SNe II-P. Данные для SNe 2004et, 2012aw приведены согласно Магауйр и др. (2010), Далл’Ора и др. (2014).

Как и для кривых в *R*-фильтре, наибольшее сходство с SN 2018aоq показывает SN 2008ip. Отметим, что в полосе *J* различие между SN 2018aоq и SN 2005cs гораздо меньше, чем в *R*-фильтре.

Кривые цвета SN 2018aоq показаны на рис. 6, они сравниваются с кривыми для трех SNe: 2008ip, показавшей наибольшее сходство с SN 2018aоq по кривым блеска, “нормальной” SN 2017eaw и “слабой” SN 2005cs. Формы кривых цвета для всех SNe II-P практически одинаковы, однако заметны различия между SNe, особенно для показателей цвета  $U - B$  и  $V - R$ . Интересно, что наибольшее сходство с SN 2018aоq показывает не SN 2008ip, как можно было ожидать, а SN 2017eaw.

Для получения квазиболлометрических звездных величин наблюдаемые звездные величины в полосах *UBVRI* пересчитывались в потоки, кото-

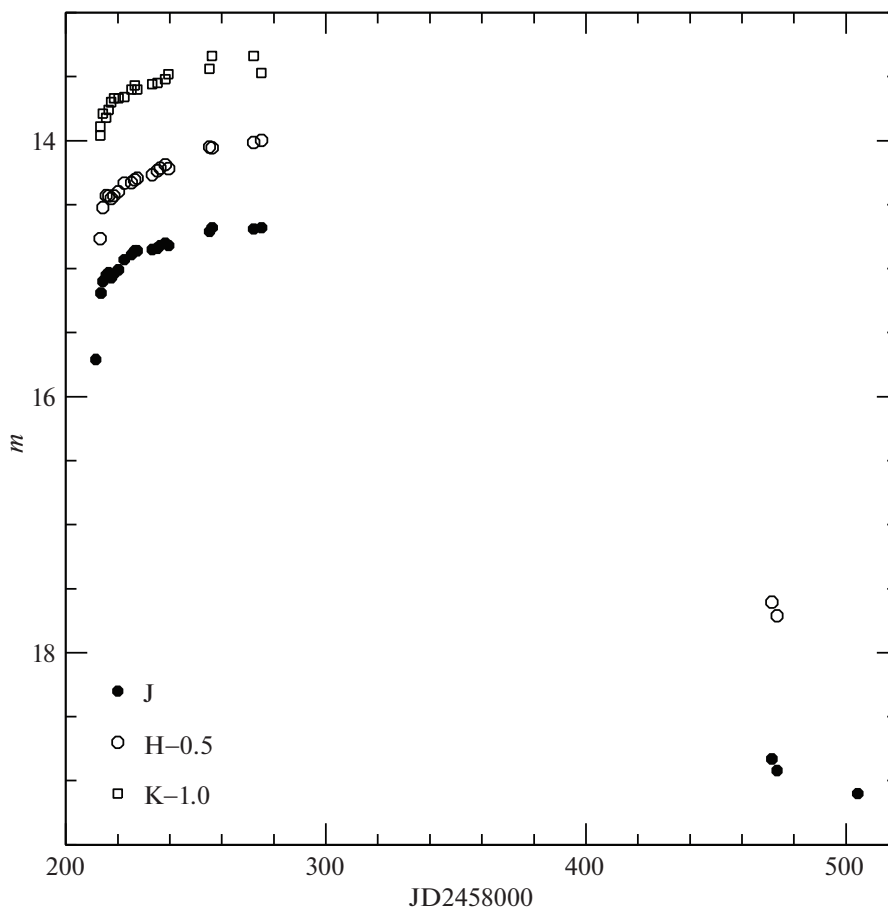


Рис. 3. Кривые блеска SN 2018aof в фильтрах JHK.

рые интегрировались в интервале длин волн 360–800 нм. Квазиболометрический поток преобразовывался в звездные величины, используя значения светимости Солнца  $L_{\odot} = 3.828 \times 10^{33}$  эрг и абсолютной болометрической звездной величины  $M_{\text{bol},\odot} = 4^m 62$ .

### МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВЫХ БЛЕСКА

Форма кривых блеска и наличие сильной линии  $\text{H}\alpha$  в спектрах показывают, что SN 2018aof является нормальной II-P SN и предсверхновая была красным сверхгигантом (RSG), что подтверждается отождествлением предсверхновой (О'Нейлл и др., 2019). SNe II-P демонстрируют большое разнообразие светимости и формы кривых блеска. Основные детали кривых блеска определяются начальным радиусом  $R_0$ , полной массой предсверхновой  $M_{\text{tot}}$ , массой  $M_{^{56}\text{Ni}}$  и энергией взрыва  $E_{\text{burst}}$  (Литвинова, Надёжин, 1985; Касен, Вусли, 2009).

Модели предсверхновых были построены в предположении неэволюционного гидростатического равновесия, как было описано в работе

Бакланова и др. (2005). В моделях первой группы, в частности M1w и M2w, мы учитывали, следуя Литвиновой и Надёжину (1983, 1985), только водородно-гелиевые оболочки, а гелиевое и металлическое ядро предсверхновой не включалось в моделирование, так как целью работы было воспроизведение наблюдений на стадии плато, где наша модель радиационной гидродинамики наиболее адекватна. Свойства плато определяются как раз самой водородно-гелиевой оболочкой. Модели второй группы, в частности M3, уже учитывают ядро, при этом положение слоев с преимущественным содержанием элементов — продуктов термоядерного горения He, C, O, следует эволюционным расчетам (Утробин и др., 2017) (рис. 7a). Полная масса моделей с ядром выше, чем в моделях первой группы, но массы H-He-оболочек у них практически совпадают, что и следует ожидать при воспроизведении плато кривых блеска.

Количество и распределение  $^{56}\text{Ni}$  существенно влияют на кривые блеска сверхновых, поэтому его распределение мы брали экспоненциально спадающим по массовой координате, как и



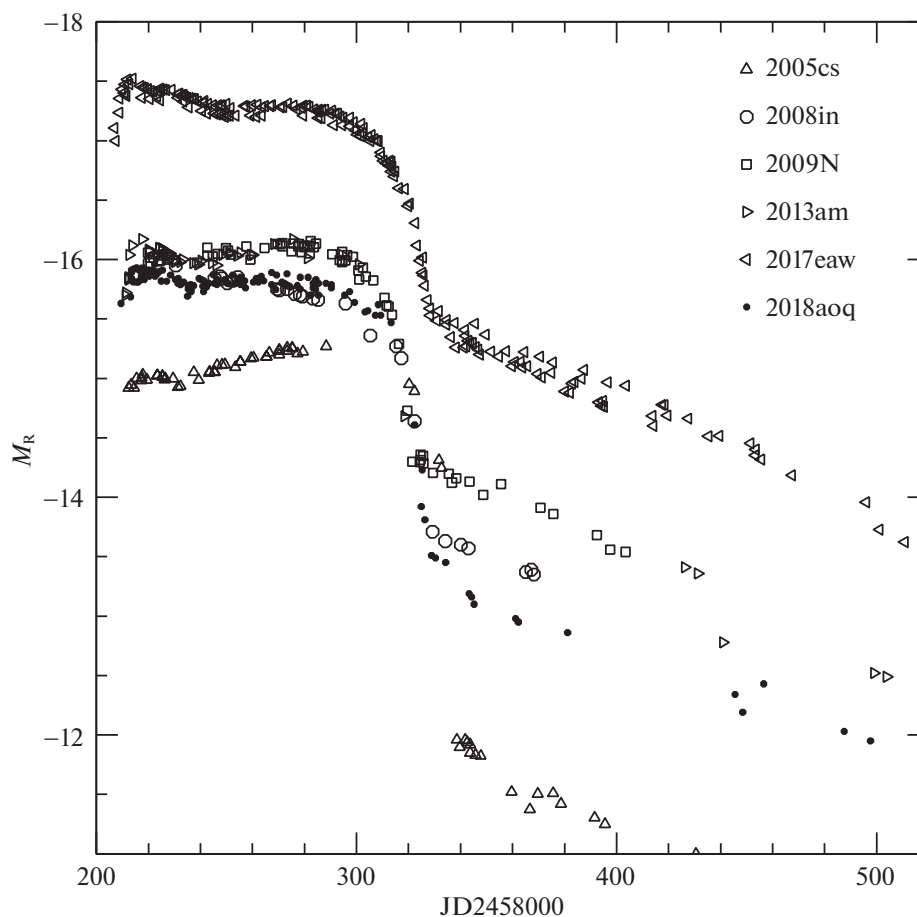


Рис. 4. Кривые блеска SN 2018aoq и пяти SNe II-P в абсолютных  $R$ -величинах.

в статье Бакланова и др. (2005), что неплохо согласуется с результатами многомерных расчетов. Прохождение ударной волны вызывает сильное перемешивание в водородной оболочке из-за неустойчивости Релея–Тейлора. Перемешивание эмулировалось боксар-интегратором с параметром  $M_{\text{боксар}} = 1.7 M_{\odot}$ , следуя работе Утробина и др. (2017).

Были проведены проверочные расчеты и для распределения  $^{56}\text{Ni}$ , степенного по радиальной координате. Поскольку в обоих вариантах 90% массы  $^{56}\text{Ni}$  было сконцентрировано в ядре, кривые блеска различались мало по сравнению с экспоненциальным случаем. Были проделаны расчеты и со значительным размещением  $^{56}\text{Ni}$ , они тоже не дали сильных отличий в кривых блеска.

Структура предсверхновых для оптимальных моделей демонстрируется на рис. 7. Взрыв SN симулировался выделением энергии взрыва в форме “тепловой бомбы” в околоцентральной области на границе прото-нейтронной звезды. Для всех моделей в наших расчетах масса прото-нейтронной

звезды принималась равной  $M_{\text{NS}} = 1.4 M_{\odot}$ . Основные параметры моделей сведены в табл. 5. Мы рассчитали сетку моделей в пространстве параметров  $(R_0, M_{\text{tot}}, M_{^{56}\text{Ni}}, E_{\text{burst}})$  для поиска наилучшей модели. Для расчетов мы использовали код многогрупповой радиационной гидродинамики STELLA (Блинников, Сорокина, 2004; Бакланов и др., 2005; Блинников и др., 2006), который успешно применяется для расчета сверхновых всех типов, включая Ib/c (Бакланов и др., 2015), II-P (Цветков и др., 2018), II-p (Поташов и др., 2013).

Для оптимальной модели M1w из первой группы перед взрывом предсверхновая была звездой с радиусом  $R_0 = 700 R_{\odot}$ , массой водородно-гелиевой оболочки  $M_{\text{HHe}} = M_{\text{tot}} = 15 M_{\odot}$ , массой радиоактивного  $^{56}\text{Ni}$ , составлявшей  $M_{^{56}\text{Ni}} = 0.01 M_{\odot}$  и металличностью  $Z = 0.002$  (табл. 5). В этой модели была добавлена небольшая околозвездная оболочка — звездный “ветер” с массой  $0.012 M_{\odot}$ , плотность в которой простиралась до  $3 \times 10^4 R_{\odot}$ , падая по закону  $1/r^2$ . Добавление такой оболочки несколько улучшает переходную фазу начального выхода на плато в кривых блеска, но в мо-

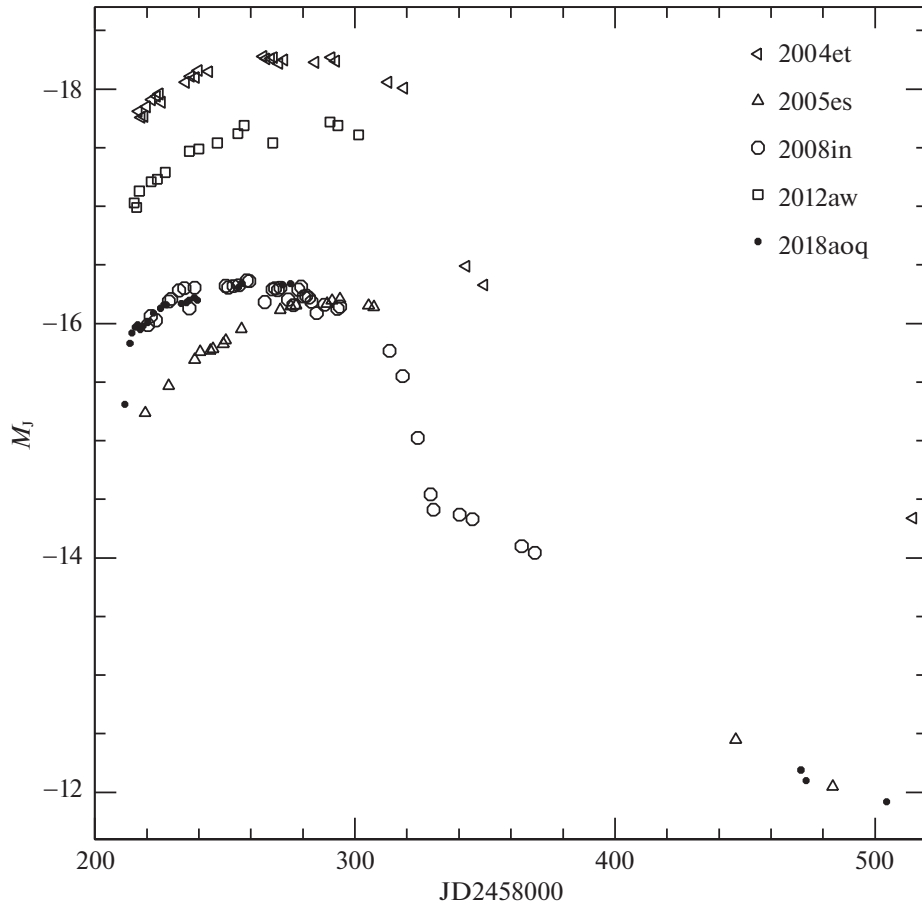


Рис. 5. Кривые блеска SN 2018aoq и четырех SNe II-P в абсолютных  $J$ -величинах.

делях второй группы M3 и M4 такая оболочка не добавлялась. Энергия взрыва M1w составила  $E_{\text{burst}} = 0.4 \times 10^{51}$  эрг, что ниже типичных значений SNII-P.

В результате для расстояния  $D = 20$  Мпк мы нашли оптимальную модель M1w в группе моделей без ядра и модель M3 в группе моделей с He-CNO ядром, которые самосогласованно воспроизводят квазиболометрическую светимость, широкополосную фотометрию в фильтрах  $UBVRI$  и эволюцию фотосферной скорости, что демонстрируется на рис. 8. Используются данные о скорости фотосферы согласно Цветкову и др. (2019).

Мы нашли, что в оптимальной модели M1w металличность  $Z = 0.002$ , что примерно в 10 раз меньше, чем у солнечного состава. Мы сравнили несколько моделей с одинаковым профилем плотности, но с разной металличностью. На рис. 9 видно, что модель M4 с большей, чем у M1w и M3, металличностью  $Z = 0.01$  также хорошо согласуется с квазиболометрической кривой блеска и фотосферными скоростями, но хуже воспроизводит широкополосную фотометрию на стадии пла-

то, показывая падение блеска в коротковолновой части спектра. Влияние металличности на кривые блеска сверхновых типа II-P недавно обсуждалось в работе Гольдштейна, Блинникова (2020).

Вывод о низкой металличности предсверхновой на основе только ЛТР-моделей кривых блеска следует принимать с осторожностью, тем не менее, качественно локальные вариации  $Z$  по галактикам совершенно не исключены. Дальнейший не-ЛТР спектральный анализ SN 2018aoq должен дать более надежные оценки  $Z$ .

Мы исследовали, насколько надо изменить модель, чтобы компенсировать изменение кривых блеска на  $0^m5$ , возникающее, если принять меньшее расстояние до NGC 4151. Оказалось, чтобы воспроизвести наблюдательные данные, достаточно уменьшить начальный радиус красного сверхгиганта. Мы нашли модель M2w с  $R_0 = 400 R_{\odot}$ , хорошо воспроизводящую наблюдения при  $D=16$  Мпк, как показано на рис. 10. Остальные основные параметры у моделей M1w и M2w совпадают. Перед плато наблюдается пик на кривой блеска, связанный с нагревом вещества оболочки выбегающей ударной волной и дальнейшим

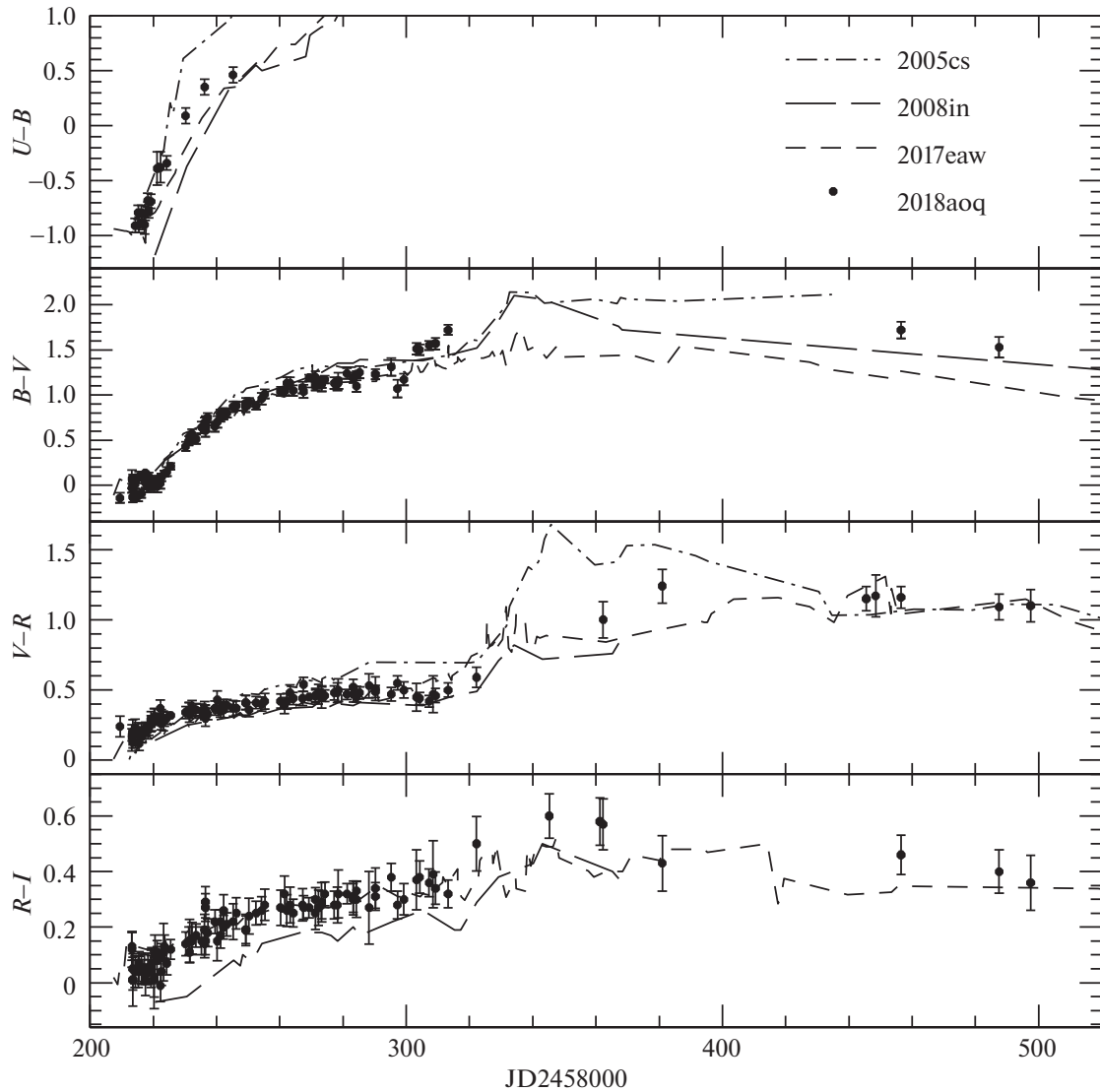


Рис. 6. Кривые цвета SN 2018aоq и трех SNe II-P.

Таблица 5. Основные параметры моделей

Модели	$R_0, R_\odot$	$M_{\text{tot}}, M_\odot$	$M_{\text{ej}}, M_\odot$	$M_{^{56}\text{Ni}}, M_\odot$	$M_{\text{He-core}}, M_\odot$	$E_{\text{burst}}, 10^{51} \text{ эрг}$	$Z$
M1w	700	15	13.6	0.01	0.0	0.4	0.002
M2w	400	15	13.6	0.01	0.0	0.4	0.002
M3	500	20	18.6	0.01	4.5	0.6	0.002
M4	500	20	18.6	0.01	4.5	0.6	0.01

**Примечание.**  $R_0$  — начальный радиус предсверхновой,  $M_{\text{tot}}$  — полная масса предсверхновой,  $M_{\text{ej}}$  — масса выброшенной оболочки,  $M_{^{56}\text{Ni}}$  — масса  $^{56}\text{Ni}$  в оболочке,  $M_{\text{He-core}}$  — масса гелиевого и CNO ядра,  $E_{\text{burst}}$  — энергия взрыва,  $Z$  — металличность во внешних слоях оболочки.

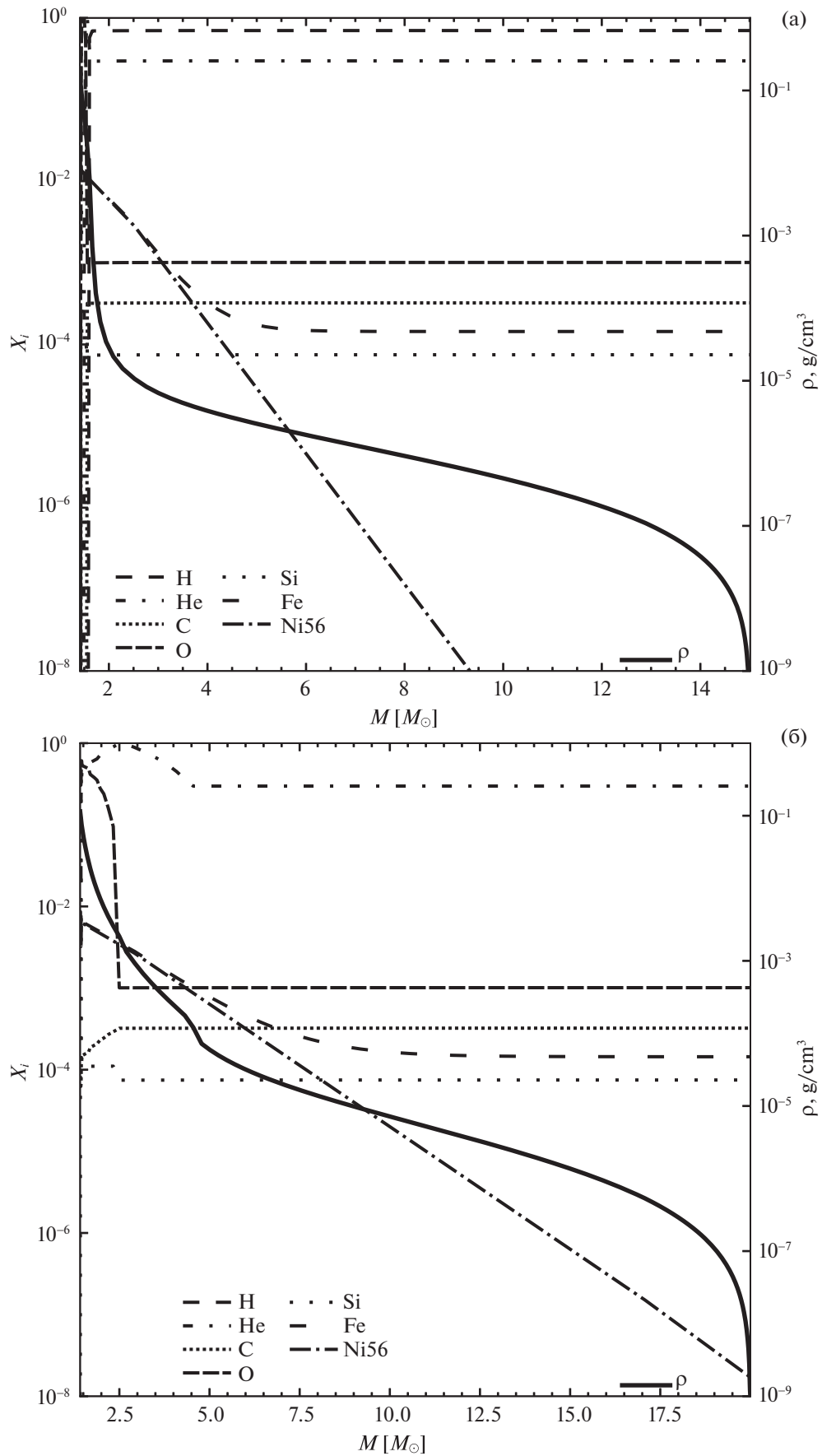
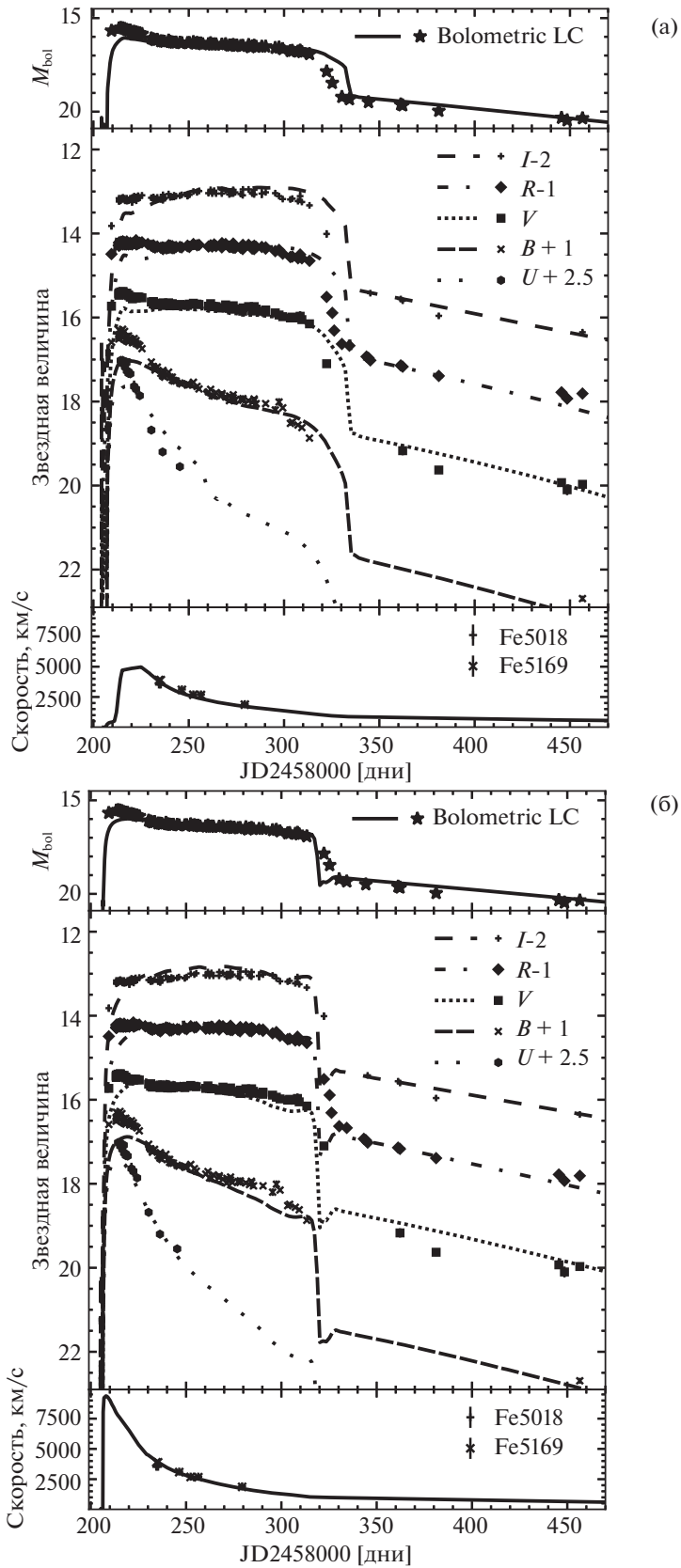
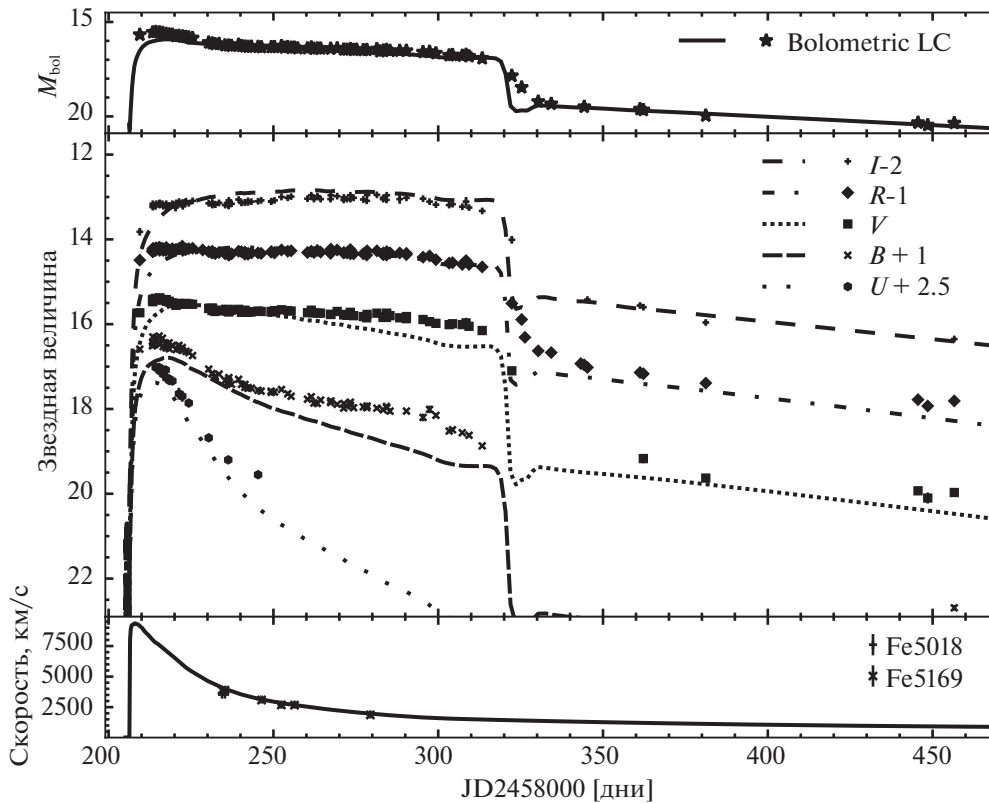


Рис. 7. Распределение элементов по массовой координате в оптимальных моделях: (а) — M1w, (б) — M3.



**Рис. 8.** Квазиболлометрические (вверху) и  $UBVR$  (в середине) кривые блеска, скорости фотосферы (внизу) SN 2018aоq и результаты расчетов для модели M1w с химическим составом из рис. 7а и M3 с химсоставом из рис. 7б при расстоянии  $D = 20$  Мпк. Точки — наблюдения, линии — результаты модельных расчетов.



**Рис. 9.** Сравнение квазиболлометрической (вверху) и  $UBVRi$  кривых блеска (в середине), эволюции скорости фотосферы SN 2018aog (внизу) для модели M4 с высокой металличностью  $Z = 0.01$ . Точки — наблюдения, линии — результаты модельных расчетов. Из-за более высокой концентрации металлов во внешних слоях оболочки растет непрозрачность, что приводит к падению потока излучения в полосах  $UBV$ , по сравнению с моделью на рис. 8.

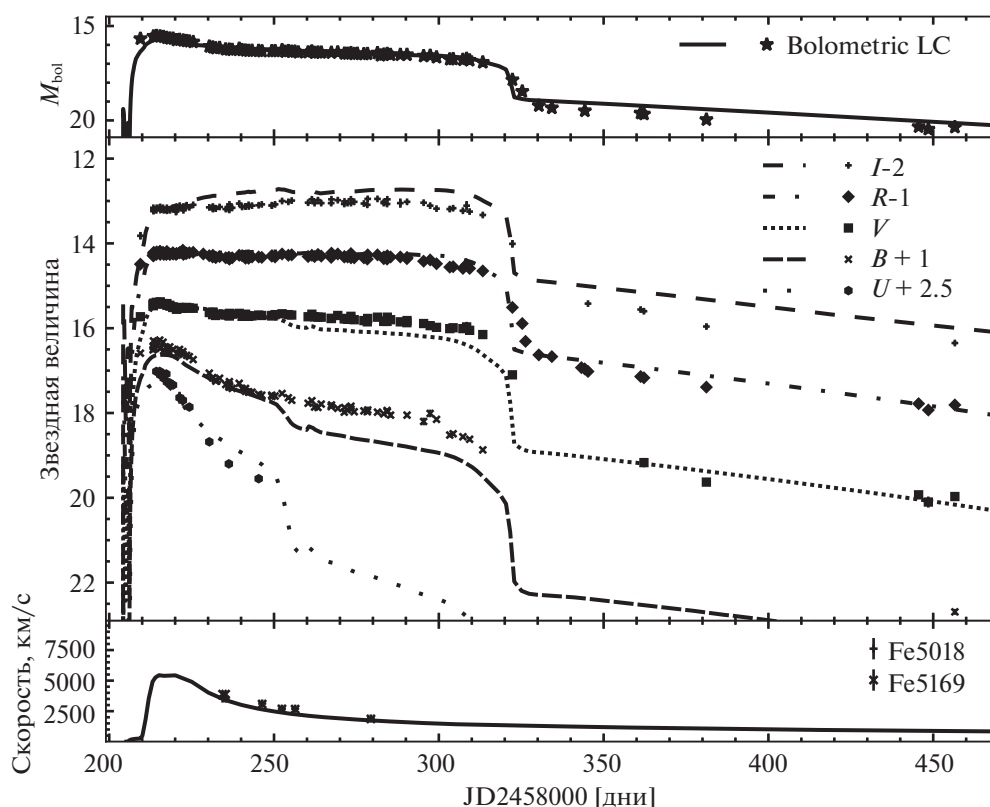
охлаждением внешней области оболочки до температуры рекомбинации. Ширина пика растет с увеличением радиуса предсверхновой (Литвинова, Надёжин, 1983), поэтому в модели M1w начальный пик сглажен по сравнению с M2w, что особенно заметно в полосе  $U$ .

Наблюдательный предел в полосе ATLAS o ( $\lambda_{\text{eff}} \sim 5330 \text{ \AA}$ ), полученный О'Нейлом и др. (2019), на эпоху JD 2458206.97 составил  $m > 18^m9$ . Интервал времени, прошедший от момента взрыва до данного предельного наблюдения, не превышает время выбегания ударной волны на поверхность звезды. При характерной скорости  $v_{\text{sh}} \sim 5000 \text{ км/с}$  (рис. 8) время выбегания составляет  $t = R_0/v_{\text{sh}} \sim 1$  сут. Таким образом, взрыв произошел в интервале от JD 2458205 до JD 2458206, что убирает одну степень свободы при поиске оптимальной модели, связанную с произвольным сдвигом теоретических кривых блеска относительно наблюдательных вдоль оси времени и накладывает на модели более жесткие ограничения. Для всех моделей из табл. 5 эпоха начала взрыва сверхновой принята  $t_{\text{exp}} = \text{JD } 2458205$ .

Для модели предсверхновой с радиусом  $R_0 = 700 R_{\odot}$  при температуре  $T = 3500 \text{ К}$  боллометрическая звездная величина на расстоянии  $D = 20 \text{ Мпк}$  составляет  $24^m2$ , что согласуется с наблюдательными ограничениями на предсверхновую, полученными в наблюдениях на телескопе им. Хаббла О'Нейлом и др. (2019).

## ВЫВОДЫ

Представлены оптические и инфракрасные кривые блеска и цвета SN 2018aog. Наши наблюдения начались сразу после открытия, и была зарегистрирована восходящая ветвь кривых блеска. Фотометрическая эволюция прослежена на стадии плато и до линейного падения блеска. Определены основные параметры кривых блеска, дана оценка светимости в максимуме. Проведено сравнение кривых блеска SN 2018aog и наиболее полно исследованных SN типа II-P. Показано, что по абсолютной величине на плато SN 2018aog занимает промежуточное положение между SNe II-P с нормальной светимостью (типичный объект



**Рис. 10.** Квазиболлометрическая (вверху) и  $UBVRI$  (в середине) кривые блеска, эволюция скорости фотосферы (внизу) SN 2018aoq для модели M2w при расстоянии  $D = 16$  Мпк. Точки — наблюдения, линии — результаты модельных расчетов.

SN 2017eaw) и SNe II-P с пониженной светимостью (SN 2005cs). Обнаружено различие в определениях расстояния до SN 2018aoq и галактики NGC 4151, полученных разными методами: от  $\sim 20$  до  $\sim 16$  Мпк. Вопрос требует дальнейшего исследования, возможно различие характера зависимости параметра фактора коррекции расстояния  $\zeta$  от  $T$  для различных SN.

Представлены результаты радиационно-гидродинамического моделирования кривых блеска и скоростей расширяющейся оболочки сверхновой SN 2018aoq с помощью кода STELLA. Наилучшее согласие с наблюдениями получено для моделей предсверхновой с полной массой выброса  $M \approx 14-19 M_{\odot}$ , массой радиоактивного  $^{56}\text{Ni}$   $0.01 M_{\odot}$ , энергией взрыва  $E = (0.4-0.6) \times 10^{51}$  эрг, при металличности  $Z = 0.1 Z_{\odot}$ . Полученные значения массы выброса после перебора десятков различных моделей предсверхновых в полтора-два раза превосходят оценку массы наблюдавшегося до взрыва красного сверхгиганта. Противоречие этого рода между разными методами определения масс предсверхновых до сих пор является нерешенной проблемой (Утробин, Чугай, 2009, 2017).

Радиус предсверхновой зависит от принимаемого расстояния  $D$  до NGC 4151 и его значения равны  $R_0 = 700 R_{\odot}$  при  $D = 20$  Мпк и  $R_0 = 400 R_{\odot}$  при  $D = 16$  Мпк.

Мы получили, что модели с металличностью в 10 раз ниже солнечного значения  $Z = 0.1 Z_{\odot}$  лучше воспроизводят наблюдательные кривые блеска, однако вопрос о металличности требует дальнейшего исследования. Малая металличность сверхновой может влиять на оценку расстояния методом SCM, что может объяснить меньшую, по сравнению с методом ЕРМ, оценку расстояния этим методом в работе Цветкова и др. (2019). Также при данной металличности требуется дополнительно исследовать модельные расчеты фактора коррекции расстояния в методе расширяющихся фотосфер (ЕРМ) и сравнение его с моделями Истмана и др. (1996) и Дессарта, Хиллиера (2005).

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета. Работа П.В. Бакланова по моделированию сверхновых кодом STELLA выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-52-12032. С.И. Блинников

и М.Г. Ушакова благодарят РФФИ за поддержку работы по развитию методов радиационной гидродинамики (грант № 19-12-00229).

Авторы благодарят И.М. Волкова, И.В. Ниженко, Т.С. Гришину, С.С. Савченко, Е.Н. Копацкую, А.А. Васильева, И.С. Троицкого, которые участвовали в наблюдениях и оказали помощь в их проведении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакланов П.В., Блинные С.И., Павлюк Н.Н., Письма в Астрон. журн. **31**, 483 (2005) [P. Baklanov, S. Blinnikov, and N. Pavlyuk, *Astron. Lett.* **31**, 429 (2005)].
2. Бакланов и др. (P.V. Baklanov, S.I. Blinnikov, M.Sh. Potashov, and A.D. Dolgov), *JETP Lett.* **98**, 432 (2013).
3. Бакланов П.В., Сорокина Е.И., Блинные С.И., Письма в Астрон. журн. **41**, 113 (2015) [P.V. Baklanov, E.I. Sorokina, and S.I. Blinnikov, *Astron. Lett.* **41**, 95 (2015)].
4. Бакланов и др. (P. Baklanov, N. Lyskova, S. Blinnikov, and K. Nomoto), *Astrophys. J.* **907**, 35 (2021).
5. Блинные, Сорокина (S. Blinnikov and E. Sorokina), *Astrophys. Space Sci.* **290**, 13 (2004).
6. Блинные и др. (S. Blinnikov, F.K. Ropke, E. Sorokina, M. Gieseler, M. Reinecke, C. Travaglio, W. Hillebrandt, and M. Stritzinger), *Astron. Astrophys.* **453**, 229 (2006).
7. Бута, Киил (R.J. Buta and W.C. Keel), *MNRAS* **487**, 832 (2019).
8. Винко и др. (J. Vinko, K. Takats, K. Sarneczky, Gy.M. Szabo, Sz. Meszaros, R. Csorvasi, T. Szalai, A. Gaspar, et al.), *MNRAS* **369**, 1780 (2006).
9. Гольдштейн А.А., Блинные С.И., Письма в Астрон. журн. **46**, 333 (2020) [A.A. Goldshtein and S.I. Blinnikov, *Astron. Lett.* **46**, 312 (2020)].
10. Далл'Ора и др. (M. Dall'Orta, M.T. Botticella, M.L. Pumo, L. Zampieri, L. Tomasella, G. Pignata, A.J. Bayless, T.A. Pritchard, et al.), *Astrophys. J.* **787**, 139 (2014).
11. Дессарт, Хиллиер (L. Dessart and D.J. Hillier), *Astron. Astrophys.* **439**, 671 (2005).
12. Жанг и др. (J. Zhang, X. Wang, P.A. Mazzali, J. Bai, T. Zhang, D. Bersier, F. Huang, Y. Fan, et al.), *Astrophys. J.* **797**, 5 (2014).
13. Истман и др. (R.G. Eastman, B.P. Schmidt, and R. Kirshner), *Astrophys. J.* **466**, 911 (1996).
14. Касен, Вусли (D. Kasen and S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **703**, 2205 (2009).
15. Киршнер, Кван (R.P. Kirshner and J. Kwan), *Astrophys. J.* **193**, 27 (1974).
16. Корнилов и др. (V.G. Kornilov, B.S. Safonov, M.V. Kornilov, N.Shatsky, O. Voziakova, S. Potanin, I. Gorbunov, V. Senik, and D. Cheryasov), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126**, 482 (2014).
17. Кутри и др. (R.M. Cutri, M.F. Skrutskie, S. van Dyk, et al.), *VizieR On-line Data Catalog: II/246* (2003).
18. Леррет и др. (S.K. Leggett, M.J. Currie, W.P. Varricatt, T.G. Hawarden, A.J. Adamson, J. Buckle, T. Carroll, J.K. Davies, et al.), *MNRAS* **373**, 781 (2006).
19. Литвинова, Надёжин (I.Yu. Litvinova and D.K. Nadyozhin), *Astrophys. Space Sci.* **89**, 89 (1983).
20. Литвинова И.Ю., Надёжин Д.К., Письма в Астрон. журн. **11**, 351 (1985) [I.Yu. Litvinova and D.K. Nadyozhin, *Sov. Astron. Lett.* **11**, 145 (1985)].
21. Маргайр и др. (K. Maguire, E. Di Carlo, S.J. Smartt, A. Pastorello, D.Yu. Tsvetkov, S. Benetti, S. Spiro, A.A. Arkharov, et al.), *MNRAS* **404**, 981 (2010).
22. Надёжин Д.К., *MNRAS* **346**, 97 (2003).
23. Наджип А.Э., Татарников А.М., Туми Д.У., Шатский Н.И., Черепашук А.М., Ламзин С.А., Белинский А.А., *Астрофиз. бюлл.* **72**, 382 (2017).
24. О'Нейл и др. (D. O'Neill, R. Kotak, M. Fraser, S.A. Sim, S. Benetti, S.J. Smartt, S. Mattila, C. Ashall, et al.), *Astron. Astrophys.* **622**, L1 (2019).
25. Никифорова и др. (A. Nikiforova, P. Baklanov, S. Blinnikov, D.A. Blinov, T.S. Grishina, Yu.V. Troitskaya, D.A. Morozova, E.N. Kopatskaya, E.G. Larionova, and I.S. Troitsky), eprint arXiv:2102.04388 (2021).
26. Пасторелло и др. (A. Pastorello, S. Valenti, L. Zampieri, H. Navasardyan, S. Taubenberger, S.J. Smartt, A.A. Arkharov, O. Bärbantner, et al.), *MNRAS* **394**, 2266 (2009).
27. Познански и др. (D. Poznanski, N. Butler, A.V. Filippenko, M. Ganeshalingam, W. Li, J.S. Bloom, R. Chornock, R.J. Foley, et al.), *Astrophys. J.* **694**, 1067 (2009).
28. Потанин С.А., Горбунов И.А., Додин А.В., Саввин А.Д., Сафонов Б.С., Шатский Н.И., *Астрон. журн.* **94**, 715 (2017).
29. Поташов М.Ш. и др., (M. Potashov, S. Blinnikov, P. Baklanov, and A. Dolgov), *MNRAS* **431**, 1 (2013).
30. Рой и др. (R. Roy, R. Kumar, S. Benetti, A. Pastorello, F. Yuan, P.J. Brown, S. Immler, T.A. Fatkhullin, et al.), *Astrophys. J.* **736**, 76 (2011).
31. Смартт и др. (S.J. Smartt, J.J. Eldridge, R.M. Crockett, and J.R. Maund), *MNRAS* **395**, 1409 (2009).
32. Смартт (S.J. Smartt), *Publ. Astron. Soc. Australia* **32**, 16 (2015).
33. Такатс и др. (K. Takats, M.L. Pumo, N. Elias-Rosa, A. Pastorello, G. Pignata, E. Pailas, L. Zampieri, J.P. Anderson, et al.), *MNRAS* **438**, 368 (2014).
34. Утробин, Чугай (V.P. Utrobin and N.N. Chugai), *Astron. Astrophys.* **506**, 829 (2009).
35. Утробин, Чугай (V.P. Utrobin and N.N. Chugai), *MNRAS* **472**, 5004 (2017).
36. Утробин и др. (V.P. Utrobin, A. Wongwathanarat, H.-Th. Janka, and E. Muller), *Astrophys. J.* **846**, 37 (2017).
37. Чонис, Гаскелл (T.S. Chonis and C.M. Gaskell), *Astron. J.* **135**, 264 (2008).



38. Хамуи, Пинто (M. Hamuy and P.A. Pinto), *Astrophys. J.* **566**, L63 (2002).
39. Хениг и др. (S.F. Hönl, D. Watson, M. Kishimoto, and J. Hjorth), *Nature* **515**, 528 (2014).
40. Цветков и др. (D.Yu. Tsvetkov, A.A. Volnova, A.P. Shulga, S.A. Korotkiy, A. Elmhamdi, I.J. Danziger, and M.V. Ereshko), *Astron. Astrophys.* **460**, 769 (2006).
41. Цветков Д.Ю., Шугаров С.Ю., Волков И.М. и др., *Письма в Астрон. журн.* **44**, 338 (2018) [D.Yu. Tsvetkov et al., *Astron. Lett.* **44**, 315 (2018)].
42. Цветков и др. (D.Yu. Tsvetkov, P.V. Baklanov, M.Sh. Potashov, V.L. Oknyansky, Kh.M. Mikailov, N.A. Huseynov, I.A. Alekberov, O.V. Khalilov, et al.), *MNRAS* **487**, 3001 (2019).
43. Шалаи и др. (T. Szalai, J. Vinko, R. Konyves-Toth, A.P. Nagy, K.A. Bostroem, K. Sarneczky, P.J. Brown, O. Pejcha, et al.), *Astrophys. J.* **876**, 19 (2019).
44. Шатский и др. (N. Shatsky, A. Belinsky, A. Dodin, S. Zheltoukhov, V. Kornilov, K. Postnov, S. Potanin, B. Safonov, A. Tatarnikov, and A. Cherepashchuk), eprint arXiv:2010.10850 (2020).
45. Юан и др. (W. Yuan, M.M. Fausnaugh, and S.L. Hoffmann), eprint arXiv:2007.07888 (2020).
46. Яманака и др. (M. Yamanaka, T. Nakaoka, M. Kawabata, H. Kimura, and K.S. Kawabata), *Astron. Telegram* **11526** (2018).