

УДК 524.31.01:52-14

# МНОГОЛЕТНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ЗВЕЗДЫ J022237.31+422234.2 В NGC 891: НОВАЯ LBV ИЛИ ЖЕЛТЫЙ ГИПЕРГИГАНТ?

© 2025 Ю. Н. Соловьева<sup>1\*</sup>, А. С. Винокуров<sup>1\*\*</sup>, Е. О. Дедов<sup>1</sup>,  
А. С. Медведев<sup>1</sup>, А. Е. Костенков<sup>1</sup>, А. Н. Саркисян<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 2 апреля 2025 года; после доработки 26 сентября 2025 года;  
принята к публикации 28 сентября 2025 года

Мы продолжаем поиск ярких голубых переменных в галактиках Местного объема с целью исследования фундаментальных параметров этих звезд в зависимости от возраста их звездного окружения и металличности газа родительских галактик. В текущей работе с привлечением данных наземных и космических (HST, JWST) телескопов исследована звезда высокой светимости J022237.31+422234.2 ( $M_{V_{\max}} \approx -10^m2$ ) в галактике NGC 891, находящейся на расстоянии около 10 Мпк. Фотометрическая переменность J022237.31+422234.2 в период с 1997 по 2024 год составила  $\Delta V = 1^m12 \pm 0^m06$ . Статистический анализ данных фотометрии в широком диапазоне длин волн показал прямую корреляцию показателя цвета ( $V - I_c$ ) с блеском звезды в фильтре  $V$  при отсутствии значимой переменности ( $B - V$ ) и ( $V - R_c$ ). На основе сравнения полученного на БТА САО РАН оптического спектра с моделями протяженных атмосфер оценены температура фотосферы и темп потери массы:  $8000 \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 10\,100$  К и  $8 \times 10^{-5} \lesssim \dot{M} \lesssim 5 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$  соответственно. Аппроксимация наблюдаемого распределения энергии в оптическом диапазоне моделями протяженных атмосфер с учетом межзвездного поглощения позволила оценить болометрическую светимость  $1.1 \times 10^6 \lesssim L \lesssim 2.6 \times 10^6 L_{\odot}$ . По данным в инфракрасном (ИК) диапазоне обнаружен значимый избыток излучения в области 1.5–8 мкм, который может указывать на наличие горячей пылевой компоненты с температурой около 1300 К. Наблюдаемые свойства J022237.31+422234.2 свидетельствуют в пользу его принадлежности к желтым гипергигантам или LBV в холодном состоянии.

Ключевые слова: звезды: эмиссионная линия,  $Ve$  — звезды: массивные — звезды: сверхгиганты — звезды: переменные: S Золотой Рыбы

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Яркие голубые переменные (luminous blue variables, LBV) представляют собой массивные звезды ( $M \geq 25 M_{\odot}$ , Humphreys et al., 2016) верхней части диаграммы Герцшпрунга–Рассела, характеризующиеся спектральной переменностью и вариациями блеска различной амплитуды. Спектральный класс ярких голубых переменных в зависимости от температуры фотосферы варьируется от Of/late-WN во время визуального минимума ( $T_{\text{eff}}$  до 35 000 К) до A–F во время визуального максимума ( $T_{\text{eff}} \sim 7000$ –9000 К), что зачастую осложняет их классификацию на фоне других звезд высокой светимости, в частности B[e]-сверхгигантов, теплых (желтых) гипергигантов, Of/late-WN и других (Humphreys et al.,

2014). Тем не менее основным классификационным критерием, позволяющим отделить LBV от остальных ярчайших звезд, является переменность типа S Dog, которая заключается в изменении блеска звезды приблизительно до  $2^m5$  одновременно с ее спектром (van Genderen, 2001). В течение цикла переменности S Dog болометрическая светимость звезды остается приблизительно постоянной, хотя и известны исключения, например AG Car (Groh et al., 2009), AFG L2298 (Clark et al., 2009), R 71 (Mehner et al., 2013) и др. Часто эти звезды окружены компактными пылевыми оболочками, образование которых связано с выбросом вещества звезды или его оттоком из двойной системы вследствие переноса газа между ее компонентами. В работе Agliozzo et al. (2021) на примере LBV и кандидатов LBV в Магеллановых Облаках показано, что эти объекты являются важным источником пыли в галактиках.

\*E-mail: solovyeva@sao.ru

\*\*E-mail: vinokurov@sao.ru

Вопрос об эволюционном статусе LBV-звезд до сих пор остается открытым. Согласно классическому представлению LBV являются непродолжительной стадией эволюции одиночной массивной O-звезды, которая, в зависимости от начальной массы, предшествует стадии Вольфа–Райе (Crowther, 2007) или взрыву сверхновой II типа (Trundle et al., 2008; Groh et al., 2013). Другим подходом к объяснению феномена LBV является рассмотрение этих звезд как результата эволюции тесных двойных систем (Smith and Tombleson, 2015; Smith, 2016; Aghakhanloo et al., 2017).

Отметим, что все исследования, направленные на вопрос об эволюционном статусе LBV, базируются на малых выборках: к 2023 году известно около 50 LBV-звезд в нашей и других галактиках<sup>1</sup> (Solovyeva et al., 2023b), причем имеющаяся выборка разнородна по наблюдательным свойствам и включает как классические LBV ( $-11^m5 \lesssim M_{\text{bol}} \lesssim -9^m7$ ), так и LBV меньшей светимости ( $-9^m5 < M_{\text{bol}} < -8^m$ ). Это обуславливает необходимость увеличивать имеющуюся выборку подтвержденных ярких голубых переменных как за счет мониторинга известных LBV-кандидатов, так и за счет поиска новых объектов данного типа, в том числе в галактиках за пределами Местной группы. В текущей публикации мы представляем результаты поиска LBV подобных звезд в галактике NGC 891.

Статья организована следующим образом: в разделе 2 приводятся детали наблюдений и обработки данных. В разделе 3 представлены результаты спектроскопии, фотометрического анализа и оценок звездных параметров. В разделе 4 обсуждается классификация изучаемого объекта.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Видимая с ребра галактика NGC 891 имеет морфологический тип SA(s)b?<sup>2</sup> и относится к галактикам Местного Объемы: оцененное методом TRGB расстояние составляет 9.10–9.95 Мпк (согласно The Extragalactic Distance Database<sup>3</sup>, Tikhonov and Galazutdinova, 2005; Mould and Sakai, 2008; Radburn-Smith et al., 2011). В данной работе было принято расстояние  $9.82 \pm 0.37$  Мпк ( $m - M = 29^m96 \pm 0^m08$ , Tikhonov and Galazutdinova, 2005).

<sup>1</sup>Основная часть ярких голубых переменных открыта в пределах 1 Мпк (Richardson and Mehner, 2018).

<sup>2</sup>Согласно Third Reference Catalogue of Bright Galaxies, version 3.9 (de Vaucouleurs et al., 1991).

<sup>3</sup><http://edd.ifa.hawaii.edu/>, также см. Tully et al. (2009).

Как и ранее Solovyeva et al. (2019, 2020, 2021, 2023), поиск ярких голубых переменных проводился по архивным данным космического телескопа имени Хаббла (HST) в широкополосных фильтрах и в одном из имеющихся узкополосных фильтров, центрированных на линию H $\alpha$ . В настоящей работе отбор LBV-кандидатов производился по данным в фильтрах *F606W*, *F814W* и *F656N*. В качестве перспективных для исследования объектов выделялись голубые звезды с H $\alpha$ -избытком. По имеющимся данным HST, покрывающим довольно ограниченную часть галактики NGC 891, нами был обнаружен один кандидат в LBV J022237.31+422234.2 (далее cLBV1, см. рис. 1).

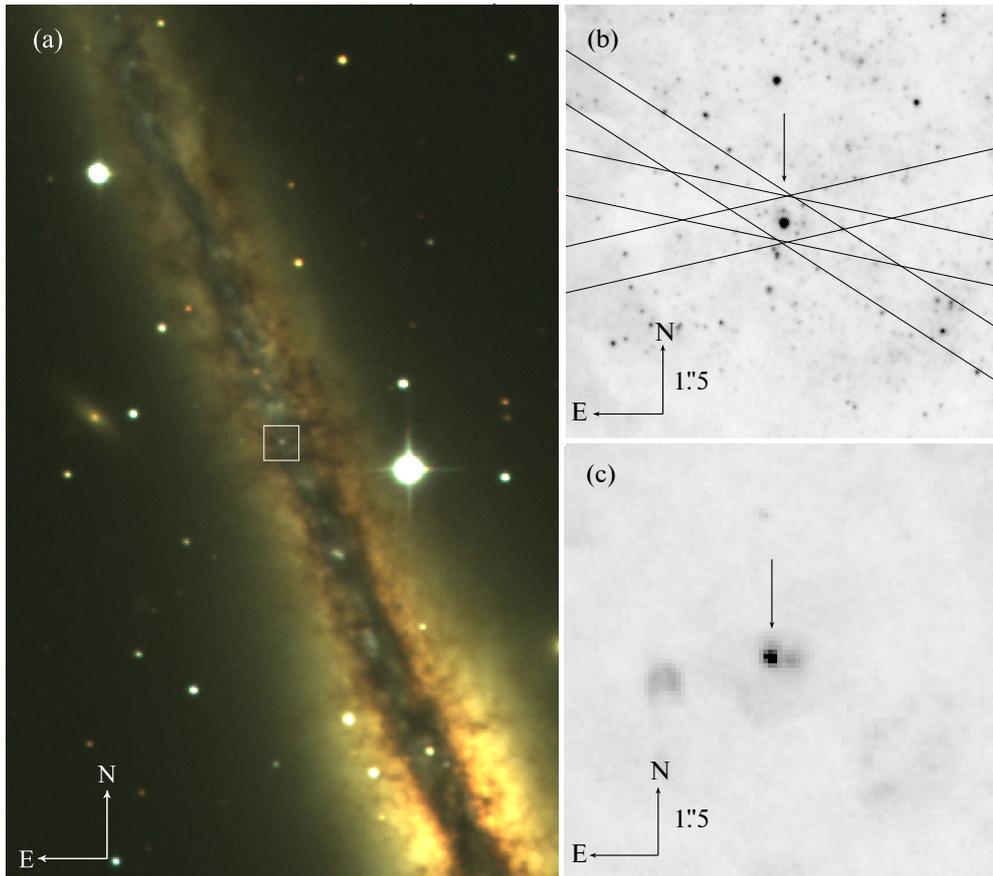
### 2.1. Спектроскопия

Первые спектральные данные cLBV1 были получены на 6-м телескопе САО РАН (БТА) в режиме длинной щели с использованием гризмы VPHG1200R спектрографа SCORPIO (Afanasiev and Moiseev, 2005) 3 января 2014 г. В полученном спектре наблюдалась эмиссионная линия H $\alpha$  с широкими крыльями, однако низкое значение *S/N* не позволило детектировать другие линии, в связи с чем мы не проводим в текущей работе детальный анализ этих данных. Дальнейшая спектроскопия объекта проводилась с помощью фокального редуктора SCORPIO-2 (Afanasiev and Moiseev, 2011) (детектор E2V CCD261-84) и решетки VPHG1200@540 в диапазоне 3650–7250 Å. Ширина щели и спектральное разрешение составляли  $\Delta w = 1''$  и  $R \approx 1200$  соответственно. Другие детали наблюдений (даты, размеры звездных изображений, ориентация щели) указаны в таблице 1. Обработка данных производилась стандартными процедурами пакета `long` в среде ESO-MIDAS<sup>4</sup>. Экстракция одномерного спектра выполнена в программе `spetra`, использующей функцию Гаусса в

**Таблица 1.** Журнал наблюдений БТА/SCORPIO-2 с решеткой VPHG1200@540. Суммарное время накопления, размер звездных изображений и позиционный угол щели обозначены  $T_{\text{exp}}$ ,  $\beta$  и  $PA$  соответственно

Date	$T_{\text{exp}}$ , s	$\beta$ , arcsec	$PA$ , deg
08.01.2022	5400	1.8	57.0
23.08.2022	3000	1.3	78.3
01.12.2022	5400	1.5	78.3
11.10.2023	5400	1.5	102.0

<sup>4</sup>Пакет программ ESO-MIDAS (Munich Image Data Analysis System) разработан в Европейской южной обсерватории.



**Рис. 1.** Панель (a) — RGB-изображение галактики NGC 891, составленное на основе данных Цейсс-1000 CAO РАН, полученных 2021/10/10 в фильтрах  $B, V, R_c$ . Белым квадратом обозначена область вблизи cLBV1, показанная на вкладках справа. Панель (b) — изображения окрестностей cLBV1 в широкополосном фильтре  $F606W$  камеры WFC3/UVIS HST. Черными линиями показаны положения щели шириной  $1''$  во время спектральных наблюдений. Панель (c) — та же область в узкополосном фильтре HST/WFPC2  $F656N$ .

качестве PSF (point spread function) и предназначенной для работы со спектрами в тесных звездных полях. Детальное описание метода представлено в работе (Sarkisyan et al., 2017).

## 2.2. Фотометрия

### 2.2.1. Оптические данные

Фотометрические данные для cLBV1 были получены на БТА (SCORPIO, SCORPIO-2) и Цейсс-1000 CAO РАН (CCD<sup>5</sup>, ММРР<sup>6</sup>), а также на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ (Wide field imager/NBI camera<sup>7</sup>). В работе также использовались архивные данные космического телескопа имени Хаббла (HST,

см. таблицу 2) и наземных телескопов: 8-м телескопа Subaru (камеры SuprimCam, Miyazaki et al., 2002) и FOCAS (Kashikawa et al., 2002) и 3.5-м телескопа обсерватории WIYN (камера S2KB).

**Таблица 2.** Результаты фотометрии cLBV1 по архивным данным HST. Звездные величины приведены в системе VEGAMAG

Camera	Date	Filter	Magnitude
WFPC2	19.02.1999	$F656N$	$18.64 \pm 0.03$
		$F675W$	$20.88 \pm 0.02$
ACS/WFC	18.02.2004	$F606W$	$21.21 \pm 0.02$
		$F814W$	$20.74 \pm 0.02$
WFC3/UVIS	08.11.2011	$F606W$	$21.36 \pm 0.02$
		$F814W$	$20.88 \pm 0.02$

<sup>5</sup><https://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/small/CCD/>

<sup>6</sup><https://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/small/ММРР/>

<sup>7</sup><https://obs.sai.msu.ru/cmo/sai25/wfi/>

**Таблица 3.** Результаты фотометрии cLBV1 по данным HST и наземных телескопов, исправленные за вклад окружения. В столбцах указаны краткие наименования телескопов, даты и скорректированные за вклад окружения (см. текст) звездные величины cLBV1 без поправки за покраснение. Звездные величины, измеренные по данным HST, пересчитаны в систему Джонсона–Казинса. Все звездные величины приведены в системе VEGAMAG. Звездочкой отмечены даты, когда проводились фотометрические и спектральные наблюдения на SCORPIO-2

Telescope	Date	$B$ , mag	$V$ , mag	$R_c$ , mag	$I_c$ , mag
WIYN, 3.5-m	30.08.1997	$21.67 \pm 0.04$	$21.24 \pm 0.04$	—	—
HST/WFPC2	19.02.1999	—	—	$20.95 \pm 0.03$	—
HST/ACS/WFC	18.02.2004	—	$21.33 \pm 0.02$	—	$20.76 \pm 0.02$
Subaru	31.10.2008	—	$21.51 \pm 0.04$	—	$20.86 \pm 0.04$
Subaru	30.11.2008	—	—	$21.13 \pm 0.06$	—
Subaru	26.09.2009	—	$21.44 \pm 0.04$	—	—
Subaru	19.10.2009	—	$21.37 \pm 0.06$	—	—
Subaru	06.01.2010	—	$21.43 \pm 0.04$	—	—
HST/WFC3/UVIS	08.11.2011	—	$21.69 \pm 0.02$	—	$20.96 \pm 0.02$
БТА	02.01.2014	—	$21.57 \pm 0.08$	$20.95 \pm 0.06$	—
БТА	16.09.2017	—	$21.32 \pm 0.09$	—	—
Цейсс-1000	07.01.2018	$21.74 \pm 0.11$	$21.26 \pm 0.12$	$21.00 \pm 0.11$	—
Цейсс-1000	31.10.2018	$21.45 \pm 0.12$	$21.12 \pm 0.11$	$20.76 \pm 0.07$	—
Цейсс-1000	04.09.2019	$21.26 \pm 0.10$	$20.90 \pm 0.09$	$20.74 \pm 0.09$	—
БТА	23.10.2019	$21.40 \pm 0.09$	$21.07 \pm 0.06$	$20.69 \pm 0.05$	—
Цейсс-1000	20.01.2020	$21.22 \pm 0.09$	$20.96 \pm 0.07$	$20.65 \pm 0.07$	—
БТА	19.08.2020	$21.30 \pm 0.08$	$20.91 \pm 0.06$	$20.61 \pm 0.05$	—
БТА	22.09.2020	$21.43 \pm 0.10$	—	$20.73 \pm 0.06$	—
Цейсс-1000	13.11.2020	$21.35 \pm 0.09$	$21.15 \pm 0.08$	$20.70 \pm 0.08$	$20.76 \pm 0.20$
Цейсс-1000	20.12.2020	$21.24 \pm 0.09$	$20.95 \pm 0.07$	$20.66 \pm 0.08$	—
Цейсс-1000	10.10.2021	$20.97 \pm 0.08$	$20.57 \pm 0.06$	$20.32 \pm 0.05$	—
БТА	08.01.2022*	—	$20.90 \pm 0.07$	—	—
БТА	23.08.2022*	$21.19 \pm 0.08$	$20.80 \pm 0.06$	$20.42 \pm 0.04$	$20.29 \pm 0.07$
БТА	01.12.2022*	$21.31 \pm 0.09$	$20.98 \pm 0.07$	$20.62 \pm 0.04$	—
БТА	19.01.2023	$21.27 \pm 0.08$	$21.03 \pm 0.07$	$20.69 \pm 0.05$	—
Цейсс-1000	20.08.2023	—	$20.91 \pm 0.08$	—	—
2.5-м КГО ГАИШ	02.09.2023	$21.07 \pm 0.09$	$20.86 \pm 0.07$	$20.64 \pm 0.06$	$20.57 \pm 0.12$
2.5-м КГО ГАИШ	20.09.2023	$21.13 \pm 0.06$	$20.89 \pm 0.04$	$20.59 \pm 0.02$	$20.35 \pm 0.03$
БТА	11.10.2023*	$21.27 \pm 0.08$	$20.86 \pm 0.06$	—	—
Цейсс-1000	03.12.2024	—	$21.00 \pm 0.07$	—	—

Измерение потоков cLBV1 на изображениях HST осуществлялось методами апертурной фотометрии с помощью пакета `apphot` в среде `IRAF`<sup>8</sup>.

<sup>8</sup>Пакет программ `IRAF` (Image Reduction and Analysis Facility) разработан в Национальной оптической астрономической обсерватории (NOAO).

Размер апертуры варьировался в зависимости от масштаба изображения разных камер. Определение звездных величин по суммарным изображениям камеры WFPC2 в формате `s0f` выполнялось в апертуре  $0''.25$ , уровень фона неба вокруг объекта вычислялся в кольцевой апертуре с внутренним ( $r_{in}$ ) и внешним ( $r_{out}$ ) радиусами

$r_{in} = 0''.5$  и  $r_{out} = 1''.0$ . Фотометрия по данным камер ACS/WFC и WFC3/UVIS в формате drc выполнена в апертурах  $0''.15$  и  $0''.12$  соответственно. Фон неба определялся в кольцевых апертурах с радиусами  $r_{in} = 0''.25$  и  $r_{out} = 0''.60$  для ACS/WFC и  $r_{in} = 0''.24$  и  $r_{out} = 0''.40$  для WFC3/UVIS. Малый размер апертур обусловлен присутствием соседних источников.

Величины апертурных поправок были получены на основе фотометрических измерений потоков 11–20 одиночных звезд в малых и больших ( $0''.5$  для ACS/WFC и WFPC2,  $0''.4$  для WFC3/UVIS) апертурах. Для удобства сравнения с наземными данными измеренные величины в фильтрах HST были переведены в систему Джонсона–Казинса с помощью пакета PySynphot<sup>9</sup>. При пересчете в качестве модельного спектра использовалось степенное распределение  $F_\lambda \propto \lambda^\alpha$ , показатель степени которого вычислялся на основе потоков в двух соседних фильтрах. Результаты фотометрии в оригинальных фильтрах HST приведены в таблице 2; пересчитанные в систему Джонсона–Казинса величины даны в таблице 3.

Первичная обработка данных наземных телескопов, включающая в себя вычитание электронного нуля, деление на плоское поле и удаление следов космических частиц, осуществлялась в среде ESO-MIDAS. Поскольку исследуемая звезда находится в тесном поле, мы не можем получить достоверные оценки ее потока при изображениях хуже  $0''.8$  даже методами PSF-фотометрии. Поэтому дальнейшие измерения блеска звезды проводились методом апертурной фотометрии с учетом вклада соседних источников в поток в выбранной апертуре<sup>10</sup>. Размер звездных изображений ( $\beta$ ) менялся от  $0''.5$  (Subaru, фильтр  $I_c$ ) до  $2''$  (БТА, фильтры  $B, V$ ), что приводило к вариациям вклада соседних источников в суммарный поток в апертуре. Кроме того, вклад окружения также зависел и от фильтра и был наибольшим в полосе  $R_c$ . Отметим, что в случае кадров с наилучшим качеством звездного изображения (Subaru, фильтры  $V$  и  $I_c$ ,  $\beta \approx 0''.5$ , 31 октября 2008 г.; 2.5-м КГО ГАИШ, фильтры  $B, V, I_c$ ,  $\beta \approx 0''.7 - 0''.8$ , 20 сентября 2023 г.), где вклад окружающих источников был кратно меньше ошибки измерения суммарного потока, коррекция за вклад не производилась.

Для изображений с худшим качеством, где вклад окружения в суммарный поток в апертуре был значительным, фотометрия выполнялась в

два этапа. Первым делом в заданных апертурах измерялся суммарный поток cLBV1 и окружения. Выбор радиусов апертуры и колец, в которых определялся уровень фона неба, обуславливался размером звездного изображения. Абсолютная калибровка полученных величин выполнялась с помощью звезд сравнения, потоки которых были измерены по данным HST. Количество звезд сравнения составляло 11 для фильтров  $B$  и  $V$ , 28 для  $R_c$  и 26 для  $I_c$ .

Измерение потока окружения производилось либо по наземным данным с наилучшим  $\beta$  (Subaru 31 октября 2008 г. для фильтра  $V$ , WIYN 3.5-м 30 августа 1997 г. для фильтра  $B$ ), либо по снимкам HST в полосах  $F606W$  и  $F814W$  (8 ноября 2011 г.) для фильтров  $R_c$  и  $I_c$  соответственно. Для наиболее корректного определения потока окружения исследуемый объект cLBV1 маскировался средними значениями фона, после чего кадр сглаживался с помощью фильтра Гаусса до соответствующих наземным данным размеров звездного изображения. Итоговое сглаженное изображение использовалось для непосредственного измерения вклада окружения в апертурах с теми же радиусами, что и при измерении суммарного потока cLBV1 и окружения (см. таблицу 4). При этом апертура центрировалась на положение удаленной со снимка звезды cLBV1. Абсолютная калибровка полученных величин выполнялась аналогичным описанному выше образом, после чего вычислялся «чистый» поток исследуемого источника.

Финальные результаты фотометрии cLBV1 после учета вклада окружения приведены в таблице 3. Для примера в таблице 4 представлены результаты измерения звездных величин до и после коррекции за вклад окружающих источников для фильтра  $B$ .

### 2.2.2. ИК-данные

Для исследования объекта в ИК-диапазоне (рис. 2) мы использовали архивные данные камер NIRCAM (фильтры  $F150W$ ,  $F277W$ ) и MIRI (фильтры  $F560W$ ,  $F770W$ ) телескопа James Webb Space Telescope (JWST), доступные в архиве MAST<sup>11</sup>. Определение звездных величин источника выполнено на ресемплированных  $i2d$ -изображениях методом апертурной фотометрии. Размеры апертур для измерения потока от объекта и определения уровня фона приведены в таблице 5. Малый размер апертур выбран во избежание вклада окружения в измеряемый поток. Апертурные поправки определялись по ярким изолированным звездам. Переход от MJy/sr (единицы измерения на калиброванных изображениях в формате  $i2d$ ) к звездным величинам в системе VEGAMAG

<sup>9</sup><https://pysynphot.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<sup>10</sup> Аналогичная идея оценки потока источников в сложных звездных полях использовалась в работе (Solovyeva et al., 2019).

<sup>11</sup><https://mast.stsci.edu/>

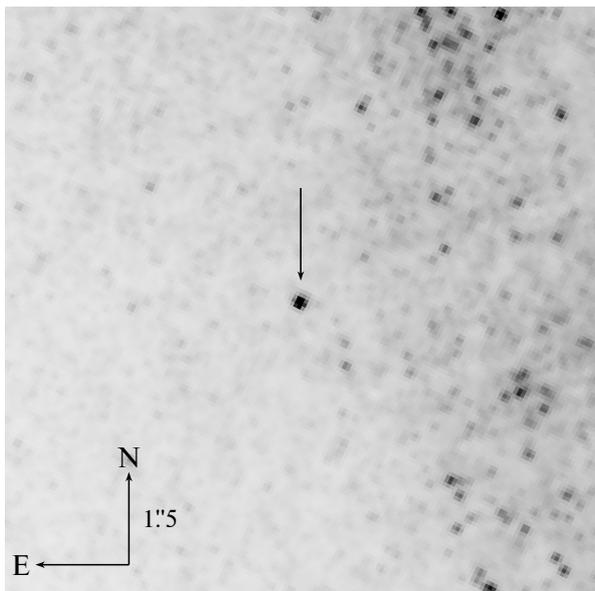


Рис. 2. Прямые изображения окрестностей cLBV1 в фильтре  $F277W$  телескопа JWST.

(таблица 5) выполнен согласно документации для пользователей JWST<sup>12</sup>.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Кривые блеска и зависимость «показатель цвета — звездная величина»

Изменение блеска cLBV1 в фильтрах  $B$ ,  $V$  и  $R_c$  показано на рис. 3а. Наиболее информативной является кривая блеска в фильтре  $V$  благодаря большому числу наблюдений в сравнении с остальными фильтрами и их более равномерному распределению по времени. Согласно имеющимся данным с 1997 по 2011 год блеск звезды в фильтре  $V$  постепенно падал, хотя высокая скважность наблюдений не позволяет судить, являлся ли данный тренд постоянным. В период 2011–2014 годы наметилось изменение в поведении объекта — его оптический блеск стал расти и в 2021 году достиг максимального значения в имеющейся выборке данных, после чего объект снова стал тускнеть. Полная амплитуда изменения звездной величины составила  $\Delta V = 1^m12 \pm 0^m06$ . В фильтрах  $B$  и  $R_c$ , по-видимому, объект демонстрирует схожее поведение.

Мы провели статистический анализ фотометрических наблюдений cLBV1 в фильтрах  $B$ ,  $R_c$ ,  $I_c$ , одновременных с  $V$ , чтобы определить характер изменения показателей цвета  $B-V$ ,  $V-R_c$  и  $V-I_c$  с блеском звезды, что может быть использовано

для классификации исследуемого объекта. Но сначала мы убедились в сохранении значимых изменений блеска во всех фильтрах при уменьшении рассматриваемых выборок наблюдений за счет отбора только тех из них, в которых имелись данные в двух и более фильтрах. Для этого использовался тест  $\chi^2$  при нулевой гипотезе, что разброс данных обусловлен только ошибками измерений. Оказалось, что, несмотря на уменьшение рассматриваемых выборок данных, значимая переменность наблюдается во всех фильтрах, что подтверждается высокими значениями  $\chi^2/\text{dof} \sim 10-90$  при вероятности нулевой гипотезы  $p_{\text{val}} \ll 0.001$  (таблица 6).

Аналогичный анализ, проведенный для показателей цвета, выявил наличие статистически значимых вариаций величины только в случае  $V-I_c$  (см. таблицу 6), для которого  $\chi^2/\text{dof}$  существенно превысил 1, а  $p_{\text{val}} = 0.0006$ . Для наглядного сравнения на рис. 3б, с представлены измерения показателей цвета  $B-V$  и  $V-I_c$  при разном блеске объекта в фильтре  $V$ . С учетом полученного результата дальнейший поиск зависимости показателя цвета от блеска объекта выполнялся только для  $V-I_c$ .

Вследствие малого размера выборки данных мы искали зависимость в виде монотонного тренда, вычисляя коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $\rho$ , а его значимость оценивалась с помощью одностороннего пермутационного теста (Ernst, 2004; Sigman, 2014). Результаты анализа показали довольно высокую степень корреляции между цветом  $V-I_c$  и блеском объекта в фильтре  $V$ :  $\rho = 0.82$ ,  $p_{\text{val}} = 0.017$ . При этом оценка 95-процентного доверительного интервала для коэффициента корреляции, полученная методом Монте-Карло в предположении, что ошибки измерений имеют нормальное распределение, дала широкий диапазон значений:  $CI(95\%) = [0.32, 0.96]$ .

В случае ярких голубых переменных, блеск и спектр которых меняются по типу S Dor, ожидается увеличение показателей цвета при росте блеска в видимом диапазоне, что отражает уменьшение температуры фотосферы звезды с увеличением ее радиуса при почти постоянной болометрической светимости (van Genderen et al., 1997; van Genderen, 2001). Однако у cLBV1 по имеющимся у нас данным наблюдается скоррелированность цвета и блеска звезды. Переменность такого типа встречается у желтых гипергигантов, например у  $\rho$  Cas (Kraus et al., 2019; Lobel et al., 2003) и Var A в галактике M 33 (Gordon and Humphreys, 2019). Тем не менее исключительно малое количество одновременных данных в нескольких фильтрах, их довольно низкое качество и обнаружение достоверной переменности только одного из показателей цвета не позволяют полностью опровергнуть ожидаемый в случае переменности типа S Dor вид

<sup>12</sup><https://jwst-docs.stsci.edu/\#gsc.tab=0>

**Таблица 4.** Результаты фотометрии в фильтре  $B$ . В таблице указаны телескопы, даты, размеры звездного изображения  $\beta$ , радиусы выбранных для измерений потока апертур  $R_{\text{ap}}$ , суммарные звездные величины  $m_{\text{LBV1}}$  и окружающих источников  $m_{\text{total}}$ , а также звездная величина окружения в заданной апертуре  $m_{\text{env}}$  и звездная величина  $m_{\text{obj}}$

Телескоп	Дата	$\beta$ , arcsec	$R_{\text{ap}}$ , arcsec	$m_{\text{total}}$ , mag	$m_{\text{env}}$ , mag	$*m_{\text{obj}}^a$ , mag
WIYN <sup>b</sup> ), 3.5-м	30.08.1997	0.70	0.40	21.67 ± 0.04	—	21.67 ± 0.04
Цейсс-1000	07.01.2018	1.60	0.86	21.51 ± 0.09	23.30 ± 0.12	21.74 ± 0.11
Цейсс-1000	31.10.2018	1.90	1.08	21.27 ± 0.10	23.33 ± 0.11	21.45 ± 0.12
Цейсс-1000	04.09.2019	1.70	1.08	21.10 ± 0.08	23.28 ± 0.11	21.26 ± 0.10
БТА	23.10.2019	1.60	0.90	21.23 ± 0.07	23.30 ± 0.11	21.40 ± 0.09
Цейсс-1000	20.01.2020	1.80	1.08	21.07 ± 0.08	23.33 ± 0.11	21.22 ± 0.09
БТА	19.08.2020	1.45	0.80	21.14 ± 0.07	23.28 ± 0.12	21.30 ± 0.08
БТА	22.09.2020	1.00	0.72	21.25 ± 0.08	23.29 ± 0.12	21.43 ± 0.10
Цейсс-1000	13.11.2020	1.60	0.86	21.18 ± 0.07	23.30 ± 0.12	21.35 ± 0.09
Цейсс-1000	20.12.2020	1.80	1.08	21.09 ± 0.08	23.33 ± 0.11	21.24 ± 0.09
Цейсс-1000	10.10.2021	1.60	0.86	20.85 ± 0.07	23.30 ± 0.12	20.97 ± 0.08
БТА	23.08.2022	1.40	0.80	21.04 ± 0.07	23.28 ± 0.12	21.19 ± 0.08
БТА	01.12.2022	1.80	1.00	21.15 ± 0.08	23.33 ± 0.11	21.31 ± 0.09
БТА	19.01.2023	2.00	1.00	21.14 ± 0.07	23.44 ± 0.12	21.27 ± 0.08
2.5-м КГО ГАИШ	02.09.2023	1.00	0.53	20.98 ± 0.08	23.70 ± 0.17	21.07 ± 0.09
2.5-м КГО ГАИШ	20.09.2023	0.80	0.45	21.13 ± 0.06	—	21.13 ± 0.06
БТА	12.10.2023	1.80	1.00	21.12 ± 0.07	23.33 ± 0.11	21.27 ± 0.08

Примечание: <sup>a)</sup> Звездные величины в данном столбце совпадают с величинами в таблице 3. <sup>b)</sup> Наблюдения WIYN 3.5-м 30.08.1997 использовались для определения вклада окружающих источников в поток в выбранной апертуре.

**Таблица 5.** Результаты ИК-фотометрии  $m_{\text{LBV1}}$  по данным JWST.  $R_{\text{ap}}$  — радиус апертуры, в которой измерялся поток от источника;  $R_{\text{in}}/R_{\text{out}}$  — внутренний/внешний радиусы кольца, в котором измерялся уровень фона. Звездные величины приведены в системе VEGAMAG

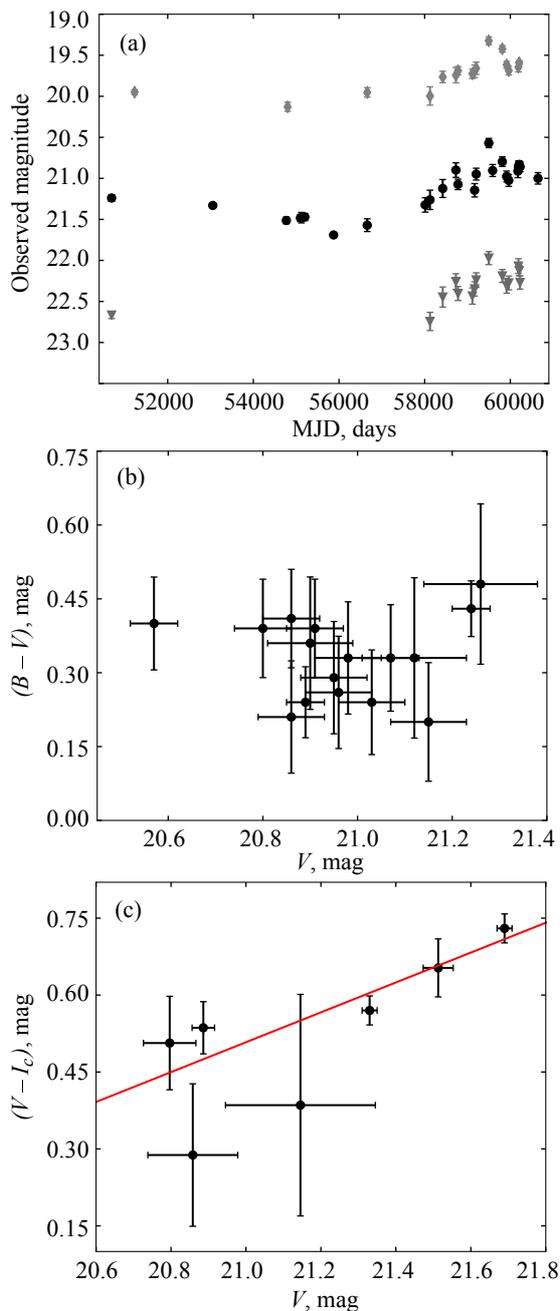
Camera/Filter	Date	$R_{\text{ap}}$ , arcsec	$R_{\text{in}}/R_{\text{out}}$ , arcsec	$m_{\text{obj}}$
NIRCAM/ $F150W$	15.08.2022	0.124	0.186/0.31	19.25 ± 0.01
NIRCAM/ $F277W$	15.08.2022	0.252	0.378/0.63	17.31 ± 0.01
MIRI/ $F560W$	18.01.2024	0.275	0.44/0.77	15.82 ± 0.04
MIRI/ $F770W$	18.01.2024	0.275	0.44/0.77	15.26 ± 0.20

зависимости цвета от блеска, что обуславливает необходимость дальнейших наблюдений с лучшим размером звездного изображения.

### 3.2. Спектральные линии

На рис. 4 в качестве примера приведен спектр  $m_{\text{LBV1}}$ , полученный при наилучших погодных условиях 23/08/2022. Показана только часть

спектра, где отношение сигнал-шум позволило выявить линии, формирующиеся в звездном ветре: широкие компоненты эмиссионных линий бальмеровской серии водорода, эмиссии Fe II и [Fe II]. Линии Fe II  $\lambda$  4923, Fe II  $\lambda$  5169 и, вероятно, Fe II  $\lambda$  5018 имеют абсорбционные компоненты слева от эмиссионной (профиль типа P Cyg). Эмиссии H $\beta$  и H $\alpha$  показывают едва заметную асимметрию, что может указывать на наличие



**Рис. 3.** Панель (а): кривые блеска sLBV1 в фильтрах  $B$  (треугольники),  $V$  (кружки) и  $R_c$  (ромбы). Данные в полосах  $B$  и  $R_c$  смещены вниз и вверх на  $1^m$  соответственно. Панель (b): изменение цвета  $B-V$  в зависимости от блеска в полосе  $V$ . Панель (с): изменение цвета  $V-I_c$  в зависимости от блеска в полосе  $V$ . Для наглядности приведена аппроксимирующая прямая  $y = ax + b$  ( $a = 0.29 \pm 0.06$ ).

скрытого P Cyg-профиля в этих линиях (см. врезку на рис. 4 и рис. 5.)

Помимо спектральных особенностей, принадлежащих звезде, в спектре видны узкие линии туманности, наиболее яркими из которых являются эмиссии водорода, [O III], [S II], [N II] и He I.

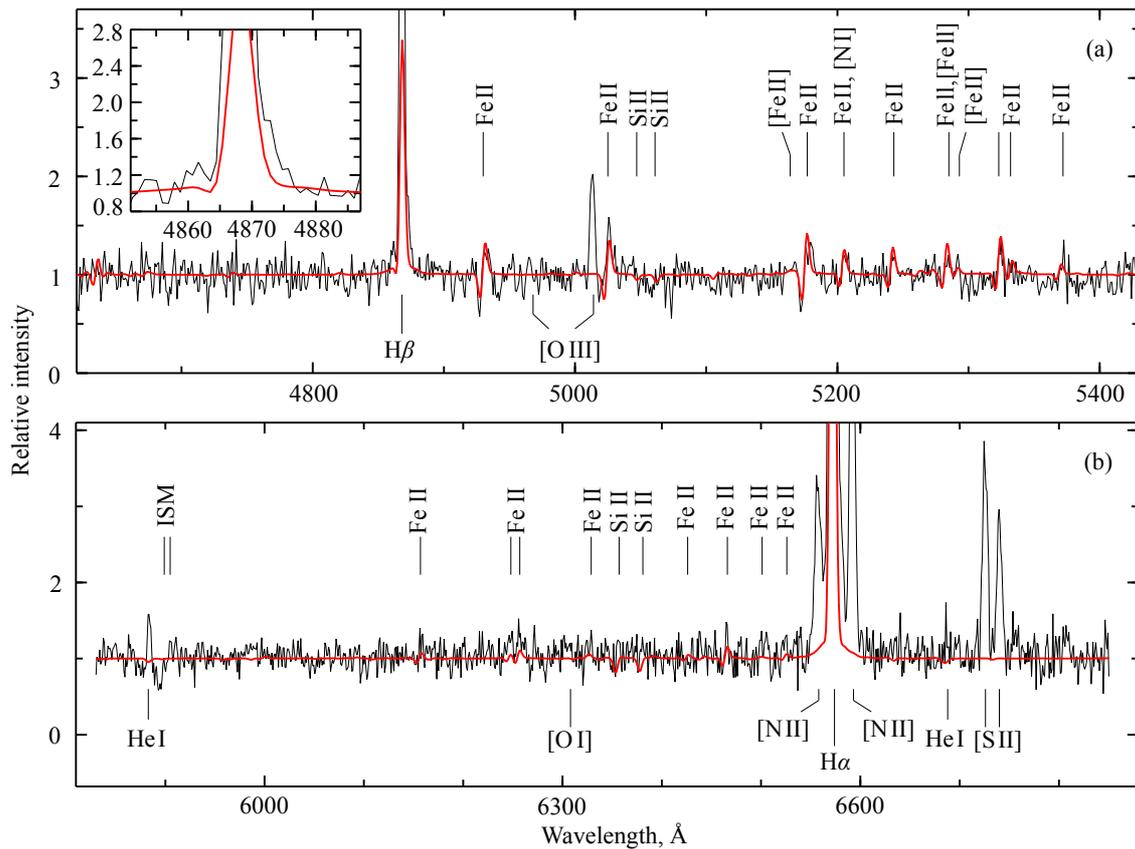
**Таблица 6.** Результаты анализа переменности звездной величины и показателей цвета объекта в разных фильтрах при нулевой гипотезе, что разброс данных обусловлен только ошибками измерений

Фильтр/Цвет	$\chi^2/\text{dof}$	$p_{\text{val}}$
$V$	144/15	$< 0.001$
$B$	134/15	$< 0.001$
$B-V$	11/15	0.76
$V$	149/14	$< 0.001$
$R$	116/14	$< 0.001$
$V-R_c$	16/14	0.31
$V$	562/6	$< 0.001$
$I_c$	341/6	$< 0.001$
$V-I_c$	29/6	$6 \times 10^{-4}$

Подобный набор линий с сильно варьирующимися интенсивностями наблюдается вдоль щелей почти по всему телу галактики, а их ширины почти везде соответствуют ширине аппаратного профиля в пределах ошибок измерений. Довольно сложный пространственный профиль областей ионизованного газа и компактность их отдельных участков (в частности, туманности в окрестностях sLBV1) препятствует корректному вычитанию их вклада на этапе экстракции спектров непрерывных источников в *spetra*. В разделе 3.3 мы более подробно обсудим разные области H II в рамках проблемы оценки величины межзвездного поглощения в направлении исследуемой звезды.

Для оценки эквивалентной ширины ( $EW$ ) и ширины ( $FWHM$ ) принадлежащей звезде компоненты линии  $H\alpha$  в нормированном спектре, полученном в августе 2022 года, мы выполнили декомпозицию наблюдаемого профиля с использованием четырех функций Гаусса, три из которых служили для аппроксимации узких эмиссий  $H\alpha$  и [N II]  $\lambda 6548$ ,  $\lambda 6583$ , формирующихся в туманности. Параметры гауссиан оставались свободными за исключением длины волны и ширины слабой эмиссии [N II]  $\lambda 6548$ , положение которой было зафиксировано относительно значительно более яркой линии [N II]  $\lambda 6583$ , а ее ширина считалась равной ширине [N II]  $\lambda 6583$ . Результат аппроксимации представлен на рис. 5b.

Полученное значение эквивалентной ширины широкой  $H\alpha$ -компоненты  $EW = -54 \pm 7 \text{ \AA}$  вполне типично для LBVs. В то же время ширина линии  $11.1 \pm 0.5 \text{ \AA}$ , что после исправления за аппаратный контур (примерно  $5.4 \text{ \AA}$ ) дает оценку собственной ширины около  $9.7 \text{ \AA}$  ( $440 \text{ км с}^{-1}$ ),



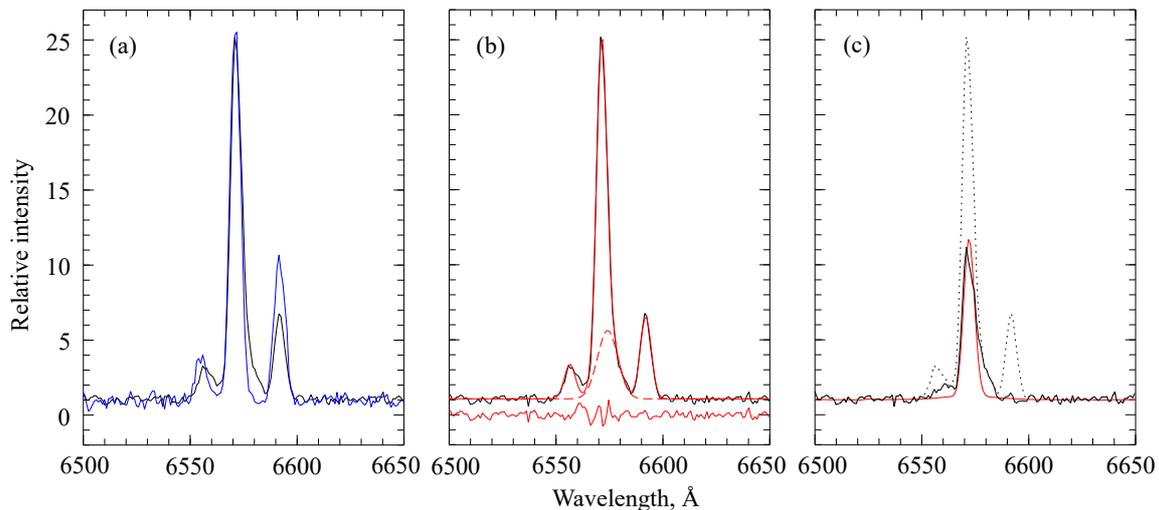
**Рис. 4.** Нормированный спектр cLBV1 (черным), полученный 23/08/2022 с помощью БТА/SCORPIO-2, и одна из наиболее подходящих моделей из сетки моделей протяженных атмосфер (красным; подробности см. в разделе 3.3). Линии, формирующиеся в фоновой туманности или имеющие значительный вклад от туманности (эмиссии бальмеровской серии водорода), отмечены ниже спектра. Сверху отмечены наиболее яркие спектральные линии (за исключением широких компонент линий водорода), формирующиеся в ветре cLBV1, а также ряд более слабых линий модельного спектра.

заметно выше характерных значений  $FWHM$  эмиссий, формирующихся в ветрах LBV в холодном состоянии<sup>13</sup>. Ширины узкой компоненты линии  $H\alpha$  и «красной» эмиссии дублета азота составили  $FWHM(H\alpha) = 5.58 \pm 0.11 \text{ \AA}$  и  $FWHM([N II] \lambda 6583) = 6.08 \pm 0.18 \text{ \AA}$ , что лишь немногим выше ширины аппаратного контура в данном диапазоне длин волн. Аналогичный Гаусс-анализ с фиксированными параметрами слабой эмиссии  $[N II] \lambda 6548$ , выполненный для ближайшей к объекту относительно яркой области  $H II$ <sup>14</sup>, дал очень близкие значения  $FWHM$  линий:  $5.79 \pm 0.06 \text{ \AA}$  в случае  $H\alpha$  и  $6.17 \pm 0.06 \text{ \AA}$  в случае  $[N II] \lambda 6583$ .

<sup>13</sup> На относительно низкие температуры (около 10 кК) в случае cLBV1 указывает наличие многочисленных линий Fe II в спектре. Более точные оценки фундаментальных параметров звезды, включая эффективную температуру, приводятся в разделе 3.3.

<sup>14</sup> Экстрагирован участок шириной  $2''.4$  на расстоянии  $6''.5$  к западу от cLBV1. Полученный спектр этой области показан на рис. 5а для сравнения со спектром объекта.

Большая ширина принадлежащей cLBV1 компоненты эмиссии  $H\alpha$ , измеренная по результатам Гаусс-анализа, может свидетельствовать в пользу того, что она представляет собой лишь часть профиля формирующейся в атмосфере звезды линии, а именно, соответствует широким крыльям, образующимся в результате рассеяния на электронах, что наблюдается в спектрах LBV и других подобных звезд (Humphreys et al., 2014). На это же косвенно указывает существенно более низкое отношение полученных при декомпозиции потоков в линии  $[N II] \lambda 6583$  и узкой компоненты  $H\alpha$   $F_{N II} / F_{H\alpha} \approx 0.29$ , чем среднее значение  $F_{N II} / F_{H\alpha} = 0.46 \pm 0.12$  в соседних областях  $H II$ . Для оценки потенциально возможных истинных значений  $EW(H\alpha)$  мы вычли из наблюдаемого спектра cLBV1 полученную в ходе Гаусс-анализа модель упомянутой выше яркой области  $H II$  по соседству со звездой, перенормировав ее так, чтобы интенсивности модельных профилей линий дублета азота были равны интенсивностям этих линий в спектре. Итоговый профиль  $H\alpha$  звезды после выполненного таким образом вычитания вклада



**Рис. 5.** Панель (а): профиль линии  $H\alpha$  в нормированном спектре cLBV1 (черным) в сравнении с профилем эмиссии  $H\alpha$  в спектре одного из участков туманности (синим). Оба спектра получены по данным 23/08/2022. Для наглядности спектр туманности нормирован так, чтобы интенсивности линии  $H\alpha$  в спектрах объекта и туманности совпадали. В спектре звезды в профиле  $H\alpha$ , помимо узкой компоненты, большая часть которой наряду с эмиссиями  $[N\ II] \lambda 6548, \lambda 6583$  принадлежит пространственно неразрешаемой со звездой туманности, хорошо заметно наличие широкой компоненты, формирующейся в звездном ветре. Панель (b): результат аппроксимации (красным) участка спектра cLBV1 в области линий  $H\alpha$  и  $[N\ II] \lambda 6548, \lambda 6583$  с использованием функций Гаусса. Снизу представлен результат вычитания модели из наблюдаемого спектра. Штриховой линией показан вклад широкой компоненты линии  $H\alpha$ . Панель (c): сравнение результата вычитания (черная сплошная линия) вклада туманности из наблюдаемого спектра объекта (черная сплошная линия) с профилем эмиссии  $H\alpha$  в модели протяженной атмосферы, показанной на рис. 4. Пунктиром показан изначальный спектр.

туманности показан на рис. 5с. Новая оценка эквивалентной ширины составляет приблизительно  $-90 \text{ \AA}$ . При этом скорректированная за спектральное разрешение ширина полученного профиля уменьшилась до  $4.5 \pm 0.3 \text{ \AA}$ , что гораздо лучше соответствует значениям, измеряемым по спектрам холодных LBV. Данные значения, однако, имеют большую неопределенность, поскольку результат вычитания сильно зависит от выбора области ионизованного газа, которая будет использоваться для оценки интенсивности узких компонент линий водорода, не принадлежащих звезде.

В завершение раздела отметим отсутствие заметной спектральной переменности объекта, какая ожидается в случае переменности типа S Dor (van Genderen, 2001). Однако все спектры cLBV1 с пригодным для анализа  $S/N$  были получены в узком временном интервале (2022–2023 гг.), когда блеск звезды оставался слабопеременным (таблица 3). Таким образом, имеющийся в нашем распоряжении набор данных не позволяет сделать вывод о вариациях спектральных характеристик исследуемой звезды при значительных изменениях блеска: для выявления спектральной переменности и сопутствующих изменений физических параметров объекта необходимо провести спектроскопию в слабом состоянии cLBV1.

### 3.3. Межзвездное поглощение и фундаментальные параметры cLBV1

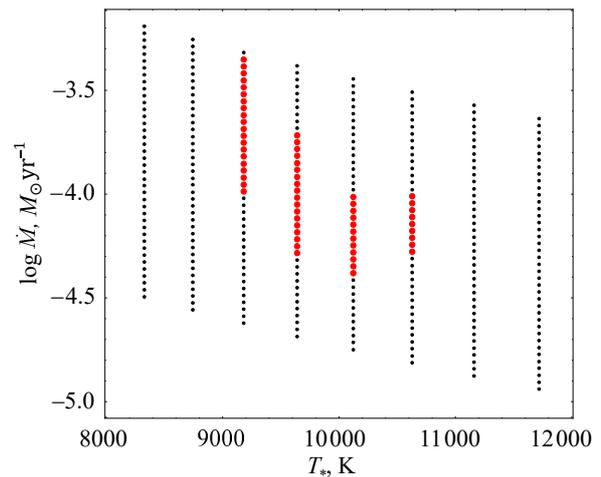
Определение фундаментальных параметров звезд требует надежной оценки межзвездного поглощения  $A_V$ . Один из методов, позволяющих получить оценки  $A_V$ , основан на анализе спектров туманностей, окружающих исследуемый объект или включающую объект звездную ассоциацию (Valeev et al., 2009; Annibali et al., 2017; Solovyeva et al., 2021). Хорошо известно, что в случае фотоионизованной плазмы значение бальмеровского декремента остается постоянным с точностью около 5% для широкого диапазона физических условий в туманности (case B, Osterbrock and Ferland, 2006):  $H\alpha : H\beta : H\gamma = 2.86 : 1 : 0.47$ . Таким образом, сравнение наблюдаемого и теоретического отношения интенсивностей эмиссионных линий водорода в спектрах фотоионизованных туманностей дает возможность довольно точно измерить полную величину межзвездного поглощения в направлении объекта, окруженного туманностью.

На изображении HST в узкополосном фильтре  $F656N$  (рис. 1с) видно несколько протяженных областей ионизованного газа, которые потенциально могут возбуждаться излучением cLBV1 и немногочисленной группы близких звезд (см. рис. 1b), по видимому входящих в состав одной звездной ассоциации. Это прежде всего компактное облако газа

приблизительно в  $0''.5$  западнее исследуемой звезды и оболочечная структура радиусом чуть более  $1''$ , наиболее яркая часть которой располагается к югу от cLBV1. Однако на спектрах данные области пространственно не разрешаются с cLBV1, поскольку расстояние от них до звезды меньше или сопоставимо с размером звездных изображений во время наблюдений. Очевидно, именно эти туманности вносят основной вклад в спектр исследуемого объекта в описываемых в предыдущем разделе узких спектральных линиях.

Продемонстрированная в предыдущем разделе неопределенность в оценке вклада звезды и ближайших областей ионизованного газа в интегральные профили линий водорода препятствует получению надежных оценок величины межзвездного поглощения по спектру, экстрагированному в локальной области  $\pm 1''$  вокруг объекта. Тем не менее мы решили проверить, удастся ли получить более-менее жесткие ограничения на величину поглощения в направлении cLBV1 на основе измерений бальмеровского декремента соседних туманностей в радиусе до 400 пк вокруг исследуемой звезды при всех позиционных углах щели. Это было бы возможно в случае относительно малого разброса оценок  $A_V$  по разным туманностям или при обнаружении плавного градиента поглощения вдоль щелей. Однако результаты измерений показали отсутствие монотонных изменений величины поглощения, а полный разброс значений составил от  $2^m$  до  $4^m$ . Оба фактора могут указывать на существенные различия положения туманностей, проецирующихся рядом с объектом, в диске галактики и, соответственно, существенно разную оптическую толщину в их направлении. Столь широкий диапазон вносит большую неопределенность в оценке истинного цвета звезды: по данным 2.5-м телескопа КГО ГАИШ за 20/09/2023 показатель цвета  $(B-V)_0$  варьируется приблизительно от  $-0^m.02$  (спектральный класс B8, Fitzgerald, 1970) до нереалистичного значения  $-1^m.02$ , что не соответствует тепловому источнику излучения. Кроме того, высокое отношение  $F_{H\alpha}/F_{NII} = 0.46 \pm 0.12$  может указывать на значительный вклад ударного механизма возбуждения газа туманности, в таком случае представленные выше оценки  $A_V$  будут завышенными.

Задача об определении фундаментальных параметров звезд с протяженными атмосферами без предварительных измерений межзвездного поглощения может быть решена методом построения не-ЛТР-моделей. Определение параметров объектов со сравнительно низкой температурой (в диапазоне от 8000 до 15 000 К) представляет собой сложную задачу в силу неизвестного ионизационного состояния вещества ветра. По этой причине мы рассчитали сетку моделей в пространстве параметров



**Рис. 6.** Область допустимых значений температуры на гидростатическом радиусе и темпа потери массы в ветре cLBV1 (красным) на фоне всего диапазона параметров, перекрываемого рассчитанной сеткой моделей протяженных атмосфер.

«эффективная температура — темп потери массы». Для создания моделей мы использовали не-ЛТР код CMFGEN (Hillier and Miller, 1998), широко применяемый для определения параметров звезд с протяженными атмосферами (Hillier et al., 2003; Groh et al., 2009; Maryeva et al., 2018; Kostenkov et al., 2020a). Модели сетки имеют зафиксированные значения светимости ( $L = 10^6 L_\odot$ ), терминальной скорости ветра ( $150 \text{ км с}^{-1}$ ) и показателя скоростного закона ( $\beta = 2$ ) (Abbott, 1982; Lamers et al., 1996). Более подробное описание сетки будет представлено в отдельной работе.

В силу низкого значения  $S/N$  в спектре cLBV1 точно определить фундаментальные параметры объекта не представляется возможным, поэтому мы произвели отбор подходящих моделей сетки для оценки границ значений температуры  $T_*$  (и  $T_{\text{eff}}$ )<sup>15</sup> и темпа потери массы  $\dot{M}$ . При выборе подходящих моделей мы ориентировались на качество воспроизведения линий блока Fe II  $\lambda\lambda 5169-5363$  и бальмеровских линий после учета вклада туманности в суммарный спектр источника. Распределение узловых моделей с отмеченной областью подходящих значений представлено на рис. 6. Границы выделенной области могут быть приняты в качестве диапазона параметров  $9200 \lesssim T_* \lesssim 10600 \text{ К}$ ,  $8000 \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 10100 \text{ К}$  и  $4 \times 10^{-5} \lesssim \dot{M} \lesssim 4 \times 10^{-4} M_\odot \text{ год}^{-1}$ . Среди всех отобранных моделей наилучшее согласие с наблюдаемым спектром объекта дает модель с тем-

<sup>15</sup> $T_*$  соответствует температуре на гидростатическом радиусе при  $\tau_{\text{Ross}} = 20-100$ .  $T_{\text{eff}}$  соответствует температуре на радиусе  $R_{2/3}$ , где  $\tau_{\text{Ross}} = 2/3$ .

пературой  $T_* = 10\,122$  К ( $T_{\text{эф}} = 9600$  К) и темпом потери массы  $\dot{M} = 5.66 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$  (см. рис. 4 и 5с).

Наличие фотометрии в широком диапазоне длин волн (фильтры  $B$ ,  $V$ ,  $R_c$ ,  $I_c$ ), полученной в ту же дату, что и спектр, позволило одновременно оценить болометрическую светимость объекта и величину поглощения  $A_V$  путем аппроксимации наблюдаемого спектрального распределения энергии отобранными выше моделями, свернутыми с заданной кривой поглощения. Для этой процедуры использовалась кривая из работы (Calzetti et al., 1994) с  $R_V = 3.1$ . Результат аппроксимации для наилучшей модели CMFGEN представлен на рис. 7, соответствующие значения болометрической светимости и величины поглощения составляют  $L = 2.3 \times 10^6 L_{\odot}$  и  $A_V = 1^{\text{m}}01$ . Применение аналогичной методики для остальных моделей сетки из области подходящих параметров дает границы значений  $1.1 \times 10^6 \lesssim L \lesssim 2.6 \times 10^6 L_{\odot}$  и  $0^{\text{m}}74 \lesssim A_V \lesssim 1^{\text{m}}05$ . Более высокая светимость звезды в сравнении с зафиксированным в моделях значением ( $10^6 L_{\odot}$ ) приводит к незначительному росту полученных оценок темпа потери вещества в ветре согласно соотношению  $\dot{M} \propto L^{3/4}$  (Kostenkov et al., 2020b), таким образом уточненный диапазон равен  $8 \times 10^{-5} M_{\odot} \lesssim \dot{M} \lesssim 5 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ .

Для построения спектрального распределения энергии cLBV1 мы также использовали данные JWST в фильтрах  $F150W$  и  $F277W$  (камера NIRCAM),  $F560W$  и  $F770W$  (камера MIRI) (см. таблицу 5). Фотометрия в фильтрах  $F150W$  и  $F277W$  (15/08/2022) близка по дате к данным БТА (23/08/2022), что позволяет исключить влияние переменности объекта на форму его спектрального распределения. Данные MIRI получены почти через полтора года (18/01/2024), однако, хоть и с большей степенью осторожности, их также можно использовать для исследования распределения энергии по длинам волн, поскольку cLBV1 в этот период не демонстрировал статистически значимых изменений блеска (см. таблицу 3).

Данные в ИК-диапазоне показывают явный избыток излучения (рис. 7), вероятно связанный с излучением околозвездной газопылевой оболочки, которая могла образоваться в результате вспышечной активности звезды, происходившей ранее. Для оценки температуры оболочки мы аппроксимировали ИК-данные путем добавления компонента чернотельного излучения с  $T_{\text{dust}} \approx 1300$  К, что является типичным значением для теплой пылевой компоненты (Valeev et al., 2009; Humphreys et al., 2013; Solovyeva et al., 2020). Присутствие в спектральном распределении энергии излучения теплой пылевой оболочки в диапазоне начиная при-

близительно с  $\lambda \approx 1.5$  мкм характерно для некоторых массивных звезд на продвинутых стадиях эволюции, например В[е]-сверхгигантов и желтых гипергигантов (Humphreys et al., 2013; Gordon and Humphreys, 2019), тогда как в распределении энергии подтвержденных LBV-звезд признаки излучения теплой пыли отсутствуют, а значимый избыток наблюдается на длинах волн  $\lambda > 8$  мкм и связан с околозвездной туманностью (Bonanos et al., 2009; Humphreys et al., 2014).

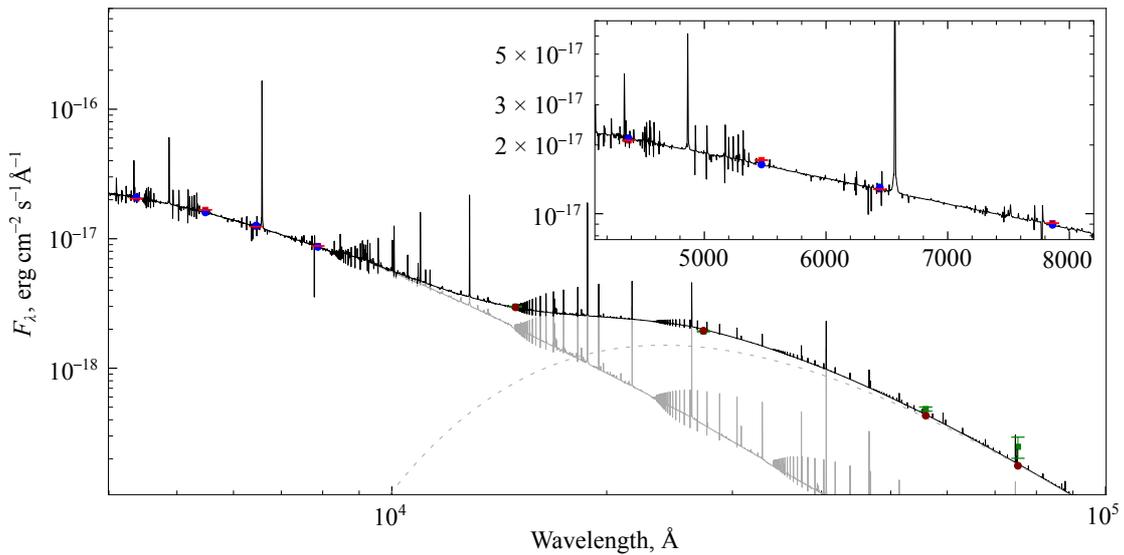
### 3.4. Диаграмма «температура – светимость»

Положение cLBV1 на диаграмме «температура – светимость» (рис. 8) соответствует обширной области значений параметров, которая пересекает область LBV (обозначены черными кружками) и лежит выше Желтого Войда и желтых гипергигантов (рис. 8). Для оценки начальной массы cLBV1 в рамках сценария эволюции одиночной звезды мы сравнили ее положение на диаграмме с эволюционными треками массивных невращающихся звезд (рис. 8). При расчете эволюционных треков с помощью кода `parsec`<sup>16</sup> (Bressan et al., 2012) мы опирались на среднее значение металличности звездного населения в галактике NGC 891:  $Z \approx 0.01 \approx 0.6 Z_{\odot}$  (Eigenbrot and Bershad, 2018). Из-за большой неопределенности светимости cLBV1 мы получаем довольно широкий диапазон возможных значений начальной массы звезды: 50–120  $M_{\odot}$ .

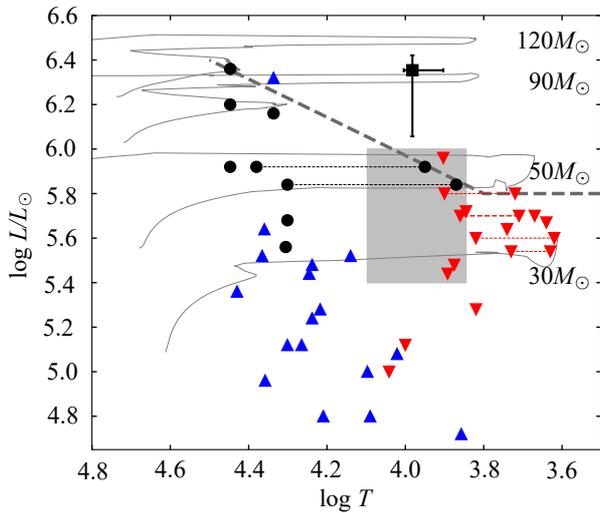
## 4. ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследован обнаруженный по данным HST LBV-кандидат cLBV1 в галактике NGC 891 с абсолютной звездной величиной в максимуме блеска  $M_{V_{\text{max}}} \approx -10^{\text{m}}2$ . Фотометрическая переменность этого источника составила более  $1^{\text{m}}$ , но изменение спектра зарегистрировано не было. При этом доступные нам спектральные данные были получены при практически одинаковой яркости объекта. На основе сравнения наблюдаемого спектра и моделей из рассчитанной сетки протяженных атмосфер мы оценили температуру фотосферы звезды  $8000 \lesssim T_{\text{эф}} \lesssim 10\,100$  К и темп потери массы  $8 \times 10^{-5} \lesssim \dot{M} \lesssim 5 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ , взяв за ориентир главным образом качество воспроизведения линий Fe II и бальмеровских линий. Аппроксимация наблюдаемого спектрального распределения энергии наиболее подходящей из отобранных моделей дает оценку болометрической светимости  $L = 2.3 \times 10^6 L_{\odot}$  при

<sup>16</sup><http://stev.oapd.inaf.it/PARSEC/>



**Рис. 7.** Спектральное распределение энергии sLBV1. Красным цветом отмечены данные БТА (23/08/2022), зеленым — данные JWST. Синие и коричневые точки соответствуют синтетической фотометрии итоговой модели. Распределение энергии было аппроксимировано составной моделью (показано черным цветом), включающей в себя наиболее подходящую модель протяженной атмосферы (светло-серый цвет) и функцию Планка (серая пунктирная линия), описывающую ИК-избыток.



**Рис. 8.** Диаграмма «температура—светимость». Наилучшая модель, описывающая наблюдаемый спектр sLBV1, отмечена черным квадратом. Область температур и светимостей моделей фотосферы, приемлемо описывающих спектр sLBV1, обозначена асимметричным крестиком. Эволюционные треки массивных неврашающихся звезд показаны серыми кривыми. Серые пунктирные линии обозначают предел Хэмфрис—Дэвидсона (Humphreys and Davidson, 1979). Серым прямоугольником обозначен Желтый Войд (de Jager and Nieuwenhuijzen, 1997). Черными кружками и синими треугольниками отмечены положения подтвержденных LBV и B[e]-сверхгигантов в галактиках M33 и M31 (Humphreys et al., 2017). Красными треугольниками обозначены положения желтых гипергигантов в галактиках M33 и M31 (Humphreys et al., 2017) и некоторых желтых гипергигантов нашей Галактики (de Jager, 1998).

$A_V = 1^m01$ . Полные диапазоны возможных значений болометрической светимости и покраснения составили  $1.1 \times 10^6 \lesssim L \lesssim 2.6 \times 10^6 L_\odot$  и  $0^m74 \lesssim A_V \lesssim 1^m05$ .

Классификация sLBV1 является непростой задачей, поскольку объект демонстрирует наблюдаемые свойства, присущие разным типам звезд высокой светимости. Его наблюдаемый спектр демонстрирует особенности, в частности, линий Fe II, характерные как для LBV в холодном состоянии, так и для желтых гипергигантов и B[e]-сверхгигантов. Однако выявленная у sLBV1 переменность блеска более  $1^m$  исключает возможность его классификации в качестве B[e]-сверхгиганта, поскольку им свойственны вариации блеска на уровне  $0^m1-0^m2$  (Lamers et al., 1998). Обнаруженные признаки отсутствия теплой околозвездной газо-пылевой оболочки ( $T_{\text{dust}} = 1300$  K), образовавшейся, вероятно, в результате эпизодов повышенной потери массы, а также положительная корреляция показателя цвета  $V-I_c$  и блеска в полосе V являются аргументами в пользу классификации объекта как желтого гипергиганта. Тем не менее на диаграмме Герцшпрунга—Рассела sLBV1 располагается значительно выше известных желтых гипергигантов и занимает положение, характерное для LBV в холодном состоянии. Эту проблему частично может решить использование меньшей оценки расстояния до NGC 891, чем принята в данной работе. Из всех доступных в литературе оценок наиболее надежными являются значения, полученные методом TRGB. Наименьшая оценка, 9.1 Мпк (Radburn-Smith et al., 2011), снизит полученную нами вели-

чину болометрической светимости на 16%. Тогда нижний предел допустимых значений светимостей сLBV1 уже вполне будет соответствовать наиболее ярким желтым гипергигантам. В то же время полученный нами диапазон оценок температуры фотосферы  $8000 \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 10100$  К также довольно высок в сравнении с температурами большинства известных желтых гипергигантов. Кроме того, нельзя исключать, что обнаруженный объект представляет собой двойную или даже кратную систему, что довольно типично для массивных звезд. В таком случае светимость звезды с мощным ветром будет ниже, а горячая пыль может быть связана, например, с экскреционным диском вокруг системы. Однако имеющиеся данные не позволяют нам подтвердить это предположение. Таким образом, несмотря на нехарактерные для LBV наблюдаемые признаки, мы оставляем сLBV1 в статусе LBV-кандидата. Окончательная классификация звезды требует продолжения ее спектрального и фотометрического мониторинга.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А. В. Моисееву за возможность использования в наблюдениях спектрографа SCORPIO-2, Д. В. Опарину за спектральные наблюдения на БТА САО РАН, а также В. П. Горанскому, А. С. Москвитину, О. И. Спиридоновой, О. А. Масленниковой за фотометрические наблюдения на Цейсс-1000 САО РАН. Наше исследование частично основано на наблюдениях HST и JWST. Данные получены из архива MAST Научного института космических телескопов, который управляется AURA, Inc. по контрактам NASA NAS 5-03127 для JWST и NAS 5-26555 для HST. Наблюдения HST связаны с заявками 6588, 9765, 12196; наблюдения JWST — с заявками 2180, 2433. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН), утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. C. Abbott, *Astrophys. J.* **259**, 282 (1982). DOI:10.1086/160166
2. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005). DOI:10.1134/1.1883351
3. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011). DOI:10.1515/astro-2017-0305
4. M. Aghakhanloo, J. W. Murphy, N. Smith, and R. Hložek, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472** (1), 591 (2017). DOI:10.1093/mnras/stx2050
5. C. Agliozzo, N. Phillips, A. Mehner, et al., *Astron. and Astrophys.* **655**, id. A98 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202141279
6. F. Annibali, M. Tosi, D. Romano, et al., *Astrophys. J.* **843** (1), id. 20 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa7678
7. A. Z. Bonanos, D. L. Massa, M. Sewilo, et al., *Astron. J.* **138** (4), 1003 (2009). DOI:10.1088/0004-6256/138/4/1003
8. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427** (1), 127 (2012). DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x
9. D. Calzetti, A. L. Kinney, and T. Storchi-Bergmann, *Astrophys. J.* **429**, 582 (1994). DOI:10.1086/174346
10. J. S. Clark, P. A. Crowther, V. M. Larionov, et al., *Astron. and Astrophys.* **507** (3), 1555 (2009). DOI:10.1051/0004-6361/200912358
11. P. A. Crowther, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **45** (1), 177 (2007). DOI:10.1146/annurev.astro.45.051806.110615
12. P. A. Curran, arXiv e-prints astro-ph:1411.3816 (2014). DOI:10.48550/arXiv.1411.3816
13. C. de Jager, *Astron. and Astrophys.* **8** (3), 145 (1998). DOI:10.1007/s001590050009
14. C. de Jager and H. Nieuwenhuijzen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **290** (3), L50 (1997). DOI:10.1093/mnras/290.3.L50
15. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin Jr., et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (Springer, New York, 1991).
16. A. Eigenbrot and M. A. Bershadsky, *Astrophys. J.* **853** (2), id. 114 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aaa45d
17. M. D. Ernst, *Statistical Science* **19** (2004). DOI:10.1214/088342304000000396
18. M. P. Fitzgerald, *Astron. and Astrophys.* **4**, 234 (1970).
19. M. S. Gordon and R. M. Humphreys, *Galaxies* **7** (4), id. 92 (2019). DOI:10.3390/galaxies7040092
20. J. H. Groh, D. J. Hillier, A. Daminieli, et al., *Astrophys. J.* **698** (2), 1698 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/698/2/1698
21. J. H. Groh, G. Meynet, and S. Ekström, *Astron. and Astrophys.* **550**, id. L7 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201220741
22. D. J. Hillier, T. Lanz, S. Heap, et al., *Astrophys. J.* **588** (2), 1039 (2003). DOI:10.1086/374329

23. D. J. Hillier and D. L. Miller, *Astrophys. J.* **496** (1), 407 (1998). DOI:10.1086/305350
24. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Astrophys. J.* **232**, 409 (1979). DOI:10.1086/157301
25. R. M. Humphreys, K. Davidson, S. Grammer, et al., *Astrophys. J.* **773** (1), article id. 46 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/773/1/46
26. R. M. Humphreys, K. Davidson, D. Hahn, et al., *Astrophys. J.* **844** (1), article id. 40 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa7cef
27. R. M. Humphreys, K. Weis, K. Davidson, and M. S. Gordon, *Astrophys. J.* **825** (1), article id. 64 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/825/1/64
28. R. M. Humphreys, K. Weis, K. Davidson, et al., *Astrophys. J.* **790** (1), article id. 48 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/790/1/48
29. N. Kashikawa, K. Aoki, R. Asai, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **54** (6), 819 (2002). DOI:10.1093/pasj/54.6.819
30. A. Kostenkov, S. Fabrika, O. Sholukhova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **496** (4), 5455 (2020a). DOI:10.1093/mnras/staa1824
31. A. Kostenkov, A. Vinokurov, Y. Solovyeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **75**, 182 (2020b). DOI:10.1134/S1990341320020078
32. M. Kraus, I. Kolka, A. Aret, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (3), 3792 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty3375
33. H. J. G. L. M. Lamers, F. Najarro, R. P. Kudritzki, et al., *Astron. and Astrophys.* **315**, L229 (1996).
34. H. J. G. L. M. Lamers, F.-J. Zickgraf, D. de Winter, et al., *Astron. and Astrophys.* **340**, 117 (1998).
35. A. Lobel, A. K. Dupree, R. P. Stefanik, et al., *Astrophys. J.* **583** (2), 923 (2003). DOI:10.1086/345503
36. O. Maryeva, G. Koenigsberger, O. Egorov, et al., *Astron. and Astrophys.* **617**, A51 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201732540
37. A. Mehner, D. Baade, T. Rivinius, et al., *Astron. and Astrophys.* **555**, id. A116 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201321323
38. S. Miyazaki, Y. Komiyama, M. Sekiguchi, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **54**, 833 (2002). DOI:10.1093/pasj/54.6.833
39. J. Mould and S. Sakai, *Astrophys. J.* **686** (2), L75 (2008). DOI:10.1086/592964
40. D. E. Osterbrock and G. J. Ferland, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*, 2nd ed. (University Science Books, Sausalito, 2006).
41. D. J. Radburn-Smith, R. S. de Jong, A. C. Seth, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **195** (2), article id. 18 (2011). DOI:10.1088/0067-0049/195/2/18
42. N. D. Richardson and A. Mehner, *Research Notes of the American Astronomical Society* **2** (3), article id. 121 (2018). DOI:10.3847/2515-5172/aad1f3
43. A. N. Sarkisyan, A. S. Vinokurov, Y. N. Solovieva, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 486 (2017). DOI:10.1134/S1990341317040137
44. N. Smith, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **461** (3), 3353 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw1533
45. N. Smith and R. Tombleson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447** (1), 598 (2015). DOI:10.1093/mnras/stu2430
46. Y. Solovyeva, A. Vinokurov, S. Fabrika, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484**, L24 (2019). DOI:10.1093/mnrasl/sly241
47. Y. Solovyeva, A. Vinokurov, A. Sarkisyan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **497** (4), 4834 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa2117
48. Y. Solovyeva, A. Vinokurov, A. Sarkisyan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (3), 4352 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2036
49. Y. Solovyeva, A. Vinokurov, N. Tikhonov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **518** (3), 4345 (2023a). DOI:10.1093/mnras/stac3408
50. Y. N. Solovyeva, A. S. Vinokurov, and A. B. Kaldybekova, *INASAN Science Reports* **8** (3), 164 (2023b). DOI:10.51194/INASAN.2023.8.3.011
51. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astrophysics* **48** (2), 221 (2005). DOI:10.1007/s10511-005-0021-8
52. C. Trundle, R. Kotak, J. S. Vink, and W. P. S. Meikle, *Astron. and Astrophys.* **483** (3), L47 (2008). DOI:10.1051/0004-6361:200809755
53. R. B. Tully, L. Rizzi, E. J. Shaya, et al., *Astron. J.* **138** (2), 323 (2009). DOI:10.1088/0004-6256/138/2/323
54. A. F. Valeev, O. Sholukhova, and S. Fabrika, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **396** (1), L21 (2009). DOI:10.1111/j.1745-3933.2009.00654.x
55. A. M. van Genderen, *Astron. and Astrophys.* **366**, 508 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20000022
56. A. M. van Genderen, C. Sterken, and M. de Groot, *Astron. and Astrophys.* **318**, 81 (1997).

## Long-Term Monitoring of the Variable Star J022237.31+422234.2 in NGC 891: a New LBV or a Yellow Hypergiant?

Yu. N. Solovyeva<sup>1</sup>, A. S. Vinokurov<sup>1</sup>, E. O. Dedov<sup>1</sup>, A. S. Medvedev<sup>1</sup>, A. E. Kostenkov<sup>1</sup>, and A. N. Sarkisyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz 369167, Russia

We continue to search for luminous blue variables (LBVs) in the Local Volume galaxies to further study their fundamental parameters in relation to the age of their stellar environments and the metallicity of the gas in their host galaxies. In this paper, we report the discovery of the luminous star J022237.31+422234.2 ( $M_{V_{\max}} < -10^{\text{m}2}$ ) in the galaxy NGC 891 located at a distance of about 10 Mpc. The study involves data from ground-based and space telescopes (HST, JWST). Over the period from 1997 to 2024, the star exhibited the photometric variability  $\Delta V = 1^{\text{m}12} \pm 0^{\text{m}06}$ . A statistical analysis of the broadband photometric data revealed a direct correlation between the  $(V - I_c)$  color index and the  $V$ -band brightness of the star, while no significant variability was observed in  $(B - V)$  and  $(V - R_c)$ . Based on a comparison of the optical spectrum obtained with the 6-m BTA telescope with a grid of extended atmosphere models, we estimated the photospheric temperature ( $8000 \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 10\,100$  K) and the mass-loss rate ( $8 \times 10^{-5} \lesssim \dot{M} \lesssim 5 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ). Fitting the observed optical spectral energy distribution with models of extended atmospheres, accounting for interstellar extinction, yielded a bolometric luminosity estimate of  $1.1 \times 10^6 \lesssim L \lesssim 2.6 \times 10^6 L_{\odot}$ . In the infrared range, a significant excess emission was detected at  $1.5\text{--}8 \mu\text{m}$ , which may indicate the presence of a warm dust with a temperature of 1300 K. The observed properties of J022237.31+422234.2 suggest its classification as a yellow hypergiant or an LBV in a cold state.

Keywords: *stars: variables: S Doradus—stars: emission-line, Be—stars: supergiants—stars: massive*