ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2020, том 46, № 7, с. 505–513

СПЕКТРОСКОПИЯ B- И Be-ЗВЕЗД В МОЛОДОМ РАССЕЯННОМ ЗВЕЗДНОМ СКОПЛЕНИИ NGC 581 (M 103)

© 2020 г. А. Е. Тарасов*

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

Поступила в редакцию 26.03.2020 г.
После доработки 01.06.2020 г.; принята к публикации 25.06.2020 г.

По спектрам умеренного разрешения в области 4200–5200 Å исследованы B- и Be-звезды в молодом рассеянном звездном скоплении NGC 581. Температуры исследуемых звезд получены дифференциальным методом с выбором простых спектроскопических параметров ряда линий и их сравнения с аналогичными параметрами обширной выборки B-звезд, для которой получены аккуратные оценки $T_{\rm eff}$ в рамках неЛТР анализа их атмосфер. Применение данного метода для исследуемой выборки объектов позволило уверенно определить возраст скопления $t = 22 \pm 1$ млн лет и модуль расстояния до скопления $(m - M)_0 = 12.4^m$. Исследована спектральная переменность эмиссионного спектра четырех Be-звезд, входящих в скопление. Показано, что все они имеют долговременную переменность профилей, характерную для классических Be-звезд.

Ключевые слова: звезды, спектральные наблюдения, рассеянные звездные скопления, Be-звезды.

DOI: 10.31857/S0320010820070086

ВВЕДЕНИЕ

Рассеянные звездные скопления традиционно являются важными объектами при исследовании эволюции звезд различных масс. Однако, несмотря на значительное их количество в Галактике, достаточно уверенное определение возраста, выполненное несколькими методами, остается явно недостаточным. На это есть ряд объективных причин, таких как небольшое количество ярких скоплений, выделение членов скоплений в густонаселенных рукавах Галактики, корректный учет межзвездного поглощения и другие. Данная работа является продолжением исследования B- и Be-звезд ранних спектральных классов (B0–B3) в молодых звездных скоплениях с возрастом менее 25 млн лет (Тарасов, Мальченко, 2012; Тарасов, 2017).

NGC 581 (M 103), несмотря на значительное количество фотометрических исследований, является относительно слабоизученным молодым умеренно населенным рассеянным звездным скоплением, расположенным в рукаве Персея. Скопление неоднократно исследовалось с использованием широкополосной фотометрии, начиная с работы Хоаг и др. (1961), однако по настоящее время для звезд скопления отсутствуют среднеполосные фотометрические наблюдения, что существенно влияет на уверенное определение его возраста. Как следует из глубоких фотометрических обзоров скопления, выполненных Сагар и Джоши (1978), Фелпс и Джанес (1994) и Саннер и др. (1999), возраст скопления составляет 16–22 млн лет, тогда как недавно выполненные исследования Дамбис и др. (2017) оценивают возраст в 58 млн лет по RI фотометрии и даже в 166 млн лет, полученных из анализа узкополосных фотометрических наблюдений в линии Hα. Скопление расположено в глубине рукава Персея, и поэтому на него проецируются многочисленные звезды фона, что заметно влияет на аккуратность в определении принадлежности звезд к скоплению. Важным шагом в выделении звезд, членов скопления, стало исследование собственных движений звезд в окрестности NGC 581, выполненных Саннер и др. (1999). Тем не менее отсутствие уверенных оценок физических параметров атмосфер звезд окончательно не сняло вопрос о возрасте скопления. Перечисленные выше проблемы, помимо всего, связаны с тем фактом, что по настоящее время выполнено единственное спектроскопическое исследование с выборкой по значительному количеству звезд.

Хуанг и др. (2010) определили физические характеристики атмосфер B-звезд по спектрам с высоким разрешением, но полученным в узком спектральном диапазоне Hγ — MgII 4481 Å. В остальных случаях физические характеристики B- и Be-звезд оценены только по бесщелевым спек-

*Электронный адрес: aetarasov@mail.ru

тральным наблюдениям с основной целью поиска звезд с эмиссией в линии Hα (Мэтью и др., 2008). Поэтому основными целями данной работы являлись спектральные исследования B- и Be-звезд скопления, аккуратное определение температуры звезд и нестационарности эмиссионного спектра Be-звезд.

НАБЛЮДЕНИЯ

Все спектральные наблюдения B- и Be-звезд скопления NGC 581 выполнены со спектрографом умеренного разрешения, установленном в фокусе Нэсмита 2.6-м телескопа ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории РАН. Спектры были получены в области длин волн 4200–5200 Å с разрешением около 2 Å и отношением сигнал/шум, как правило, лучше 100. Всего были получены спектры для 18 B- и Be-звезд скопления и нескольких звезд, которые оказались звездами фона. Последние были исключены при последующем анализе. Дополнительно с теми же аппаратными установками были получены спектры более 30 B-звезд из списка Любимков и др. (2000, 2002), для которых по неЛТР моделям атмосфер с высокой точностью определены параметры их атмосфер. Данные спектры в дальнейшем были использованы при определении эффективной температуры $T_{\rm eff}$ для B-звезд скопления.

Последующая редукция спектрограмм выполнялась по стандартной методике, включающей учет плоского поля, вычитание свечения ночного неба и рассеянного света, привязку к шкале длин волн по линиям гелий-неоновой лампы и нормировку к континууму при помощи полиномиального сплайна. Барицентрические юлианские даты приводились на середину каждой экспозиции. Для корректного исключения событий, связанных с попаданием на спектр космических частиц, каждый спектр обычно состоял из двух экспозиций, продолжительностью до 30 мин. Точность привязки спектра к шкале длин волн была не хуже 10 км с$^{-1}$.

Полный список исследованных B-звезд скопления приведен в табл. 1. Представленная идентификация звезд скопления соответствует нумерации базы данных WEBDA (https://webda.physics.muni.cz/). Особое внимание уделено исследованию нестационарности Be-звезд скопления. Для этого в течение ряда сезонов нами получено значительное количество наблюдений всех известных Be-звезд и детально исследована переменность эмиссионного спектра четырех Be-звезд. В табл. 2 представлен журнал наблюдений Be-звезд NGC 581-49, NGC 581-76, NGC 581-87 и звезды a (V1122 Cas). В таблице также представлены измеренные параметры эмиссионной компоненты линии Hβ, а именно, отношение интенсивностей эмиссионных пиков V/R. У звезды a эмиссионный профиль оставался однокомпонентным, поэтому приводится только его интенсивность над континуумом спектра. Измерения интенсивностей эмиссионных пиков осуществлялись от уровня континуума. В случаях, когда пик эмиссионной компоненты располагался под уровнем континуума, его интенсивность рассчитывалась над уровнем фотосферного профиля линии. Погрешности в определении параметра V/R составляли $\sim$0.015.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР B-ЗВЕЗД СКОПЛЕНИЯ

При определении эффективной температуры $T_{\rm eff}$ B- и Be-звезд скопления был применен дифференциальный метод. Поскольку возраст скопления приблизительно известен и лежит, по разным оценкам, в пределах 18–30 млн лет, разумно предположить, что звезды более ранних спектральных классов B0–B3 являются нормальными гигантами, тогда как более холодные звезды B4–B7 все еще остаются нормальными карликами. Исходя из этого, нами получены спектры более 30 звезд из списка Любимков и др. (2000, 2002), удовлетворяющие данному критерию, с теми же аппаратурными установками спектрографа, которые использовались при наблюдениях звезд скопления.

Поскольку определение параметров атмосфер стандартных звезд выполнено очень аккуратно, по спектрам высокого разрешения и с использованием неЛТР моделей атмосфер, разумно выбрать ряд простых критериев, позволяющих сравнить спектры звезды скопления и стандартных объектов. Проще всего в нашем случае оценить эффективные температуры звезд $T_{\rm eff}$, что дает возможность исключить цвет звезд (обычно $B-V$) при определении эволюционного статуса членов скопления. Другой важный параметр $\log g$, напрямую связанный со светимостью звезды, более сложен в определении и по спектрам нашего качества менее предпочтителен определению блеска звезды, особенно в отсутствие фотометрических данных, полученных при помощи среднеполосной фотометрии.

Для определения температуры были выбраны следующие параметры спектров: отношение остаточных интенсивностей линий $I_{\rm HeI4471}/I_{\rm MgII4481}$; эквивалентные ширины линий Hβ и Hγ, измеренные в спектральном диапазоне $\pm$30 Å от центра линии; остаточные интенсивности линий металлов, таких как OII 4640, 4349, 4367, 4415, 4417, 4642, 4649, 4591, 4661, 4705 Å, CII 4267, 4735, 4744 Å, SiIII 4552, 4568 Å, SiII 5041, 5056 Å (их интенсивности существенно меняются в изучаемом диапазоне температур). При измерении W_λ(Hγ) фактически измерялась бленда, куда,

Таблица 1. Физические параметры B- и Be-звезд скопления NGC 581

N_{WEBDA}	V	JDh (2400000)	$T_{\rm eff}$, K	π, мкс дуги
35	10.488	57080.343	19000	–
41	12.257	56578.476	15000	0.427 ± 0.028
		57259.549		
42	11.248	56223.506	18000	0.368 ± 0.041
		57080.389		
56	12.176	57260.448	15000	0.447 ± 0.049
59	11.478	56692.373	17500	0.331 ± 0.037
		57046.301		
70	11.785	57233.324	16500	0.310 ± 0.036
73	10.603	56223.459	19500	0.895 ± 0.391
		57233.391		
111	11.871	56537.564	16000	0.331 ± 0.028
122	11.028	57046.437	18500	0.27 ± 0.032
127	9.110	56223.531	21000	0.392 ± 0.034
128	12.225	56223.555	15000	0.436 ± 0.028
147	13.346	57260.596	12000	0.317 ± 0.021
158	12.670	57260.522	16000	0.397 ± 0.049
175	12.361	57260.379	14500	0.456 ± 0.045
7834	11.850	56578.567	16000	0.399 ± 0.032
		56861.427		
49 Be	11.776		16200	0.312 ± 0.030
76 Be	11.432		15500	0.449 ± 0.035
87 Be	11.352		15700	0.304 ± 0.047
a Be	9.712		21000	0.300 ± 0.031

помимо Hγ, входил ряд линий OII в красном крыле, которые при нашем спектральном разрешении образовывали неразделяемую депрессию. Измерение W_λ(Hβ) также имело сложности, связанные с удаленностью скопления ($\sim$2.9 кпк, Саннер и др., 1999) и присутствием относительно интенсивной межзвездной депрессии неизвестного происхождения в красном крыле линии (Хербиг, 1975). Она аппроксимировалась профилем Гаусса по красному крылу депрессии и вычиталась (детали методики ее учета более подробно описаны в Тарасов и др., 2016). Точность измерения эквивалентных ширин по линиям HI была ниже еще и вследствие необходимости однородного проведения континуума. Однако в целом, с учетом аккуратного подбора стандартных звезд с ограниченным набором светимостей, соответствующих приблизительно известному возрасту скопления, был получен результат, заметно превосходящий по точности случай прямого применения моделей атмосфер к спектрам имеющегося спектрального разрешения.

Таблица 2. Параметры эмиссионной линии Hβ у Be-звезд скопления NGC 581

JDh (2400000)	V/R	JDh	V/R	JDh	I
NGC 581-76		NGC 581-87		a	
56223.309	0.815	56223.358	0.987	56578.544	1.166
56537.467	0.795	56537.516	0.974	56665.348	1.204
56578.357	0.799	56578.403	0.980	56692.254	1.202
56665.303	0.798	56665.395	0.990	56861.474	1.146
56692.210	0.838	56692.301	0.996	56872.436	1.121
56861.381	0.829	56898.507	1.012	56898.434	1.102
56872.484	0.817	56899.468	1.000	56899.422	1.119
56898.366	0.825	57045.247	1.010	56903.322	1.127
56899.376	0.788	57080.295	1.011	57045.316	1.230
56900.353	0.816	57233.485	1.010	57046.368	1.217
56903.375	0.822	57259.384	1.014	57080.248	1.197
56904.239	0.819			57233.279	1.294
57045.201	0.870	NGC 581-49		57259.317	1.333
57046.183	0.846	56222.535	0.999		
57080.203	0.858	56223.236	1.008		
57232.268	0.868	57232.314	abs.		
57233.438	0.839	57759.460	1.014		
57259.249	0.854				
57260.284	0.862				

Для каждого из выбранных критериев были получены зависимости их изменения с температурой, которые затем аппроксимировались полиномами. По совокупности перечисленных выше критериев, погрешности при определении $T_{\rm eff}$ для не эмиссионных B-звезд не превышали 500°. Следует учесть, что погрешности в независимых определениях температуры каждой из стандартных звезд из списка Любимков и др. (2000, 2002) лежат в этих же пределах. Наши оценки $T_{\rm eff}$ для не эмиссионных звезд скопления NGC 581 представлены в табл. 1.

Погрешности в определении $T_{\rm eff}$ для Be-звезд существенно выше и составляют около 2000°. Это связано с тем, что при оценке $T_{\rm eff}$ использовался в основном только параметр $I_{\rm HeI4471}/I_{\rm MgII4481}$. Полученные оценки температуры Be-звезд также приведены в таблице. Детальное исследование атмосфер ряда звезд скопления NGC 581 выполнялось ранее в работе Хуанг и др. (2010). Для определения параметров атмосфер звезд скопления ими использовались только линия Hγ и стандартные ЛТР модели Куруца. Звезды, для которых выполнены измерения $T_{\rm eff}$ нами и этими авторами, представлены на рис. 1. Как следует из рисунка, в некоторых случаях расхождения в оценках температуры звезд весьма значительны и существенно превышают приводимые погрешности. На наш взгляд, столь значительные расхождения связаны прежде всего с использованием единственной линии Hγ при одновременном определении $T_{\rm eff}$ и $\log g$. Применение стандартных ЛТР моделей атмосфер существенно в меньшей степени повлияло на точность определения температур.

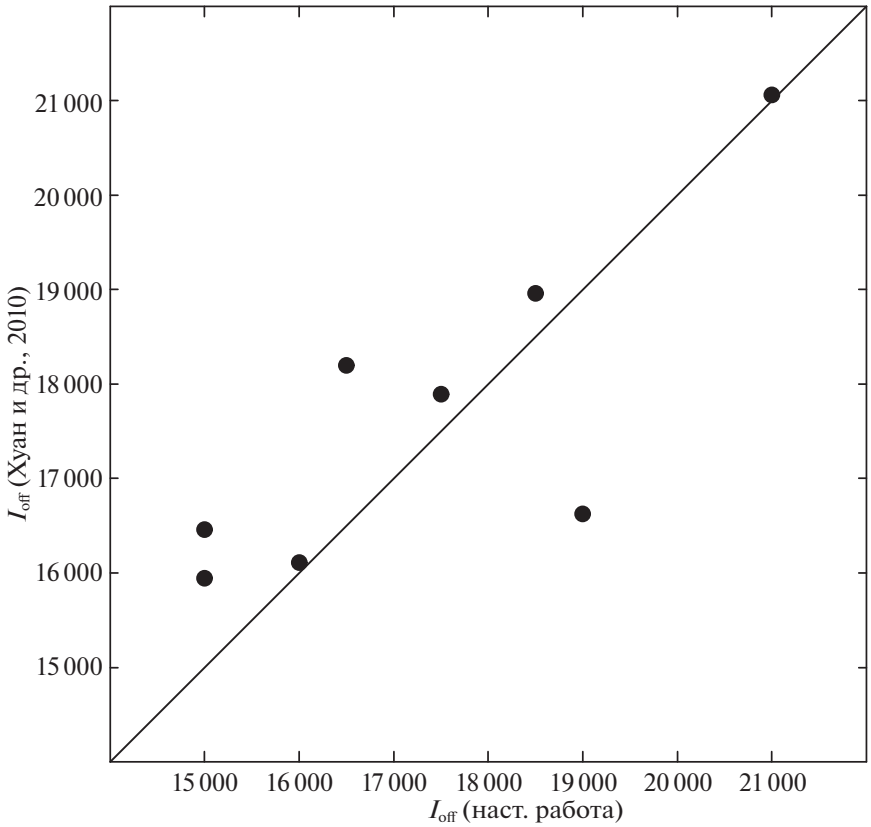

Рис. 1. Сопоставление полученных оценок $T_{\rm eff}$ для B-звезд скопления NGC 581 в настоящей работе и данных, взятых из работы Хуанг и др. (2010).

ВОЗРАСТ СКОПЛЕНИЯ NGC 581

Поскольку скопление достаточно удалено и расположено внутри рукава Персея, в его направлении расположены как минимум три выраженные звездные группировки, не считая звезд фона (Саннер и др., 1999). Это, безусловно, существенно затрудняет определение принадлежности звезд к скоплению и соответственно нахождение его базовых параметров. Детальная идентификация членов скопления выполнялась в нескольких работах, во всех случаях за основу брались результаты широкополосной фотометрии. Наиболее детальным можно считать исследование, выполненное Саннер и др. (1999). Авторы, помимо фотометрии BV, изучили собственные движения звезд, что позволило создать наиболее обширный список звезд — членов скопления и уверенно определить базовые параметры скопления.

При определении возраста скопления нами использовались наблюдения в фильтре V, взятые из работы Саннер и др. (1999) (за исключением Be-звезды “a” (V1122 Cas)), а также определенные выше значения $T_{\rm eff}$, которые приведены в табл. 1. На рис. 2 изображены полученные результаты. Как следует из рисунка, нам удалось уверенно оценить возраст скопления, используя эффективную температуру как независимый от фотометрических наблюдений параметр. Изохрона, приведенная на рисунке, построена по эволюционным моделям Брессан и др. (2012) для солнечной металличности. Наилучшее согласие наблюдаемых данных с теоретическими расчетами получено для возраста скопления $t = 22 \pm 1$ млн лет и модуля расстояния $(m - M)_0 = 12.4^m$. Несмотря на то что оценки блеска V наблюдаемых спектроскопически звезд взяты из работы Саннер и др. (1999), ими по фотометрическим данным $V - (B - V)$ получены несколько отличные результаты: $t = 16 \pm 4$ млн лет и модуль расстояния $(m - M)_0 = 12.3 \pm 0.1^m$. Тем не менее наши оценки искомых параметров лежат практически в пределах представленных погрешностей авторов.

Положения ряда звезд на рис. 2 недостаточно хорошо укладываются на использованную изохрону. Прежде всего это Be-звезды 76, 87 и V1122 Cas (звезда a). Помимо значительно большей погрешности в измерениях температуры, заметное влияние оказывает наличие газового диска вокруг данных объектов. Звезда 35, согласно измерениям лучевых скоростей Лиу и др. (1989), является спектрально двойной системой. Наша оценка эффективной температуры звезды 158 не может быть понижена,

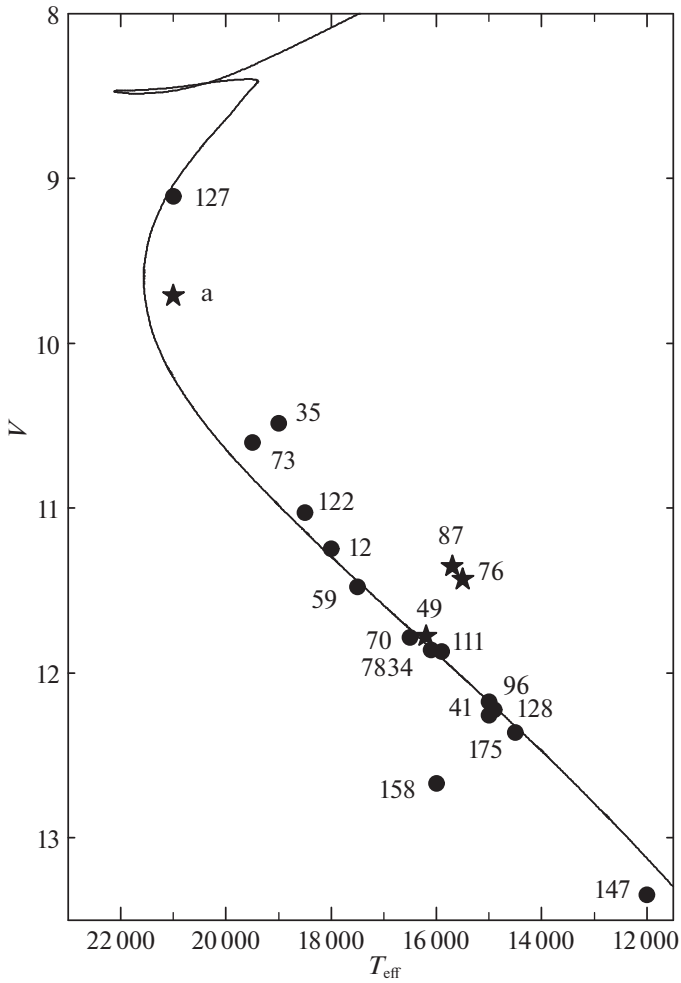

Рис. 2. Диаграмма $T_{\rm eff} - V$, построенная по звездам для скопления NGC 581. Кружки — B-звезды; звездочки — Be-звезды. Непрерывная линия — изохрона, построенная скоплением возрастом $t = 22$ млн лет, металличностью $Z = 0.02$ и модулем расстояния $(m - M)_0 = 12.4^m$. Номера звезд приведены по каталогу WEBDA, символом "a" отмечена V1122 Cas.

и причина выпадения ее из общей зависимости не установлена.

Определение параллаксов исследуемых звезд скопления выполнено с помощью телескопа Gaia-DR2 (Группа Гая и др., 2018) и приведено в табл. 1. Как видно из таблицы, параллаксы подтвержденных членов скопления, исключая несколько существенно выпадающих значений, демонстрируют заметное рассеяние данных в диапазоне 0.45–0.30 мкс дуги, что соответствует расстоянию до скопления 2.2–3.3 кпк. Оценка расстояния по паралаксам звезд, исследуемых в данной работе, совпадает с более обширным исследованием Кантат-Гаудин и др. (2018). Указанные авторы получили расстояние 2.49 кпк. Определение расстояния до скопления по фотометрическим данным дает 2.2 кпк (Саннер и др., 1999), что указывает на хорошее согласие между обоими методами в определении расстояния до скопления.

Be-ЗВЕЗДЫ И ИХ НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ

В течение нескольких сезонов нами исследована переменность эмиссионного спектра четырех известных Be-звезд скопления. Спектры всех звезд продемонстрировали долговременную переменность профилей эмиссионных линий на различных временных промежутках. На рис. 3 представлено по несколько типичных профилей в спектральной области 4830–4950 Å, куда попадают линии Hβ и HeI 4921 для Be-звезд 49, 76, 87 и V1122 Cas. Юлианские даты получения каждого из спектров представлены справа на каждом из рисунков. Для удобства отображения спектры последовательно сдвинуты на постоянную величину по интенсивности. Как видно из рисунка, профили линии Hβ у звезд 49 и 76 имеют ярко выраженную двухкомпонентную структуру со значительной переменностью интенсивности эмиссионных компонент в период наблюдений. Двухкомпонентная

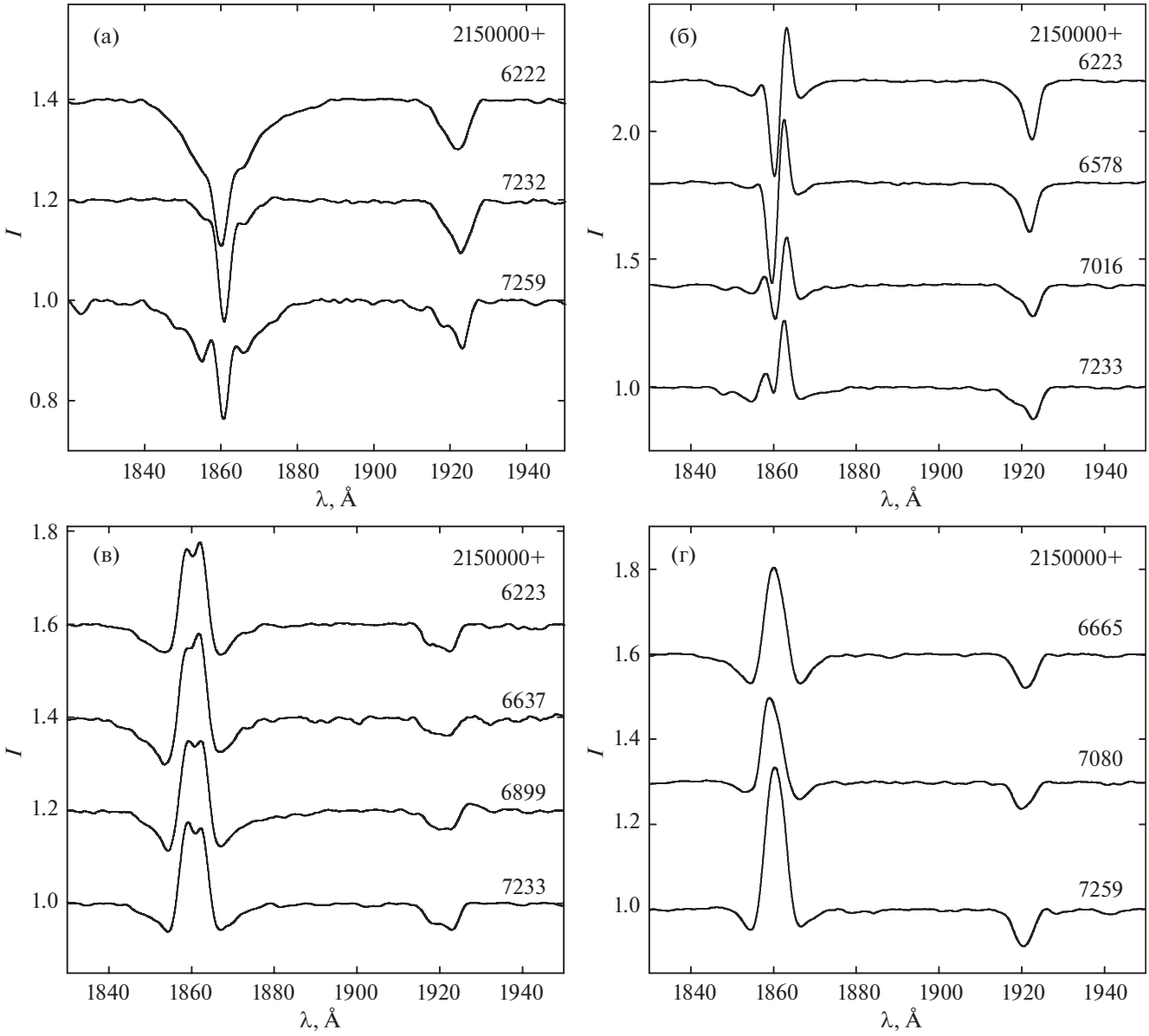

Рис. 3. Избранные профили четырех исследуемых Be-звезд в скоплении NGC 581, демонстрирующие нестационарность эмиссионного спектра в области длин волн 4830–4950 Å. На рисунке последовательно представлены спектры звезд: (а) — NGC 581–49, (б) — NGC 581–76, (в) — NGC 581–87, (г) — V1122 Cas (звезда а).

структура профиля Hβ у звезды 87 была менее выражена, хотя интенсивность компонент также заметно менялась во времени. Профиль линии Hβ у звезды V1122 Cas оставался однокомпонентным, хотя интенсивность линии заметно варьировалась от сезона к сезону.

Также обращает на себя внимание заметная переменность профиля линии HeI 4921. На представленных профилях видно присутствие дополнительной абсорбционной компоненты (в меньшей степени для звезды V1122 Cas). Во всех случаях данная компонента смещена в синюю область спектра на несколько десятков км с$^{-1}$, а ее интенсивность заметно варьируется со временем, что указывает на нестационарность звездного ветра во внутренних частях диска данных звезд.

Для эмиссионной составляющей профиля линии Hβ были измерены интенсивности эмиссионных компонент V и R и их отношение V/R. Последняя величина традиционно используется как хороший индикатор нестационарности оболочек Be-звезд на различных временных интервалах.

Все четыре исследованные Be-звезды показали признаки переменности как интенсивностей эмис-

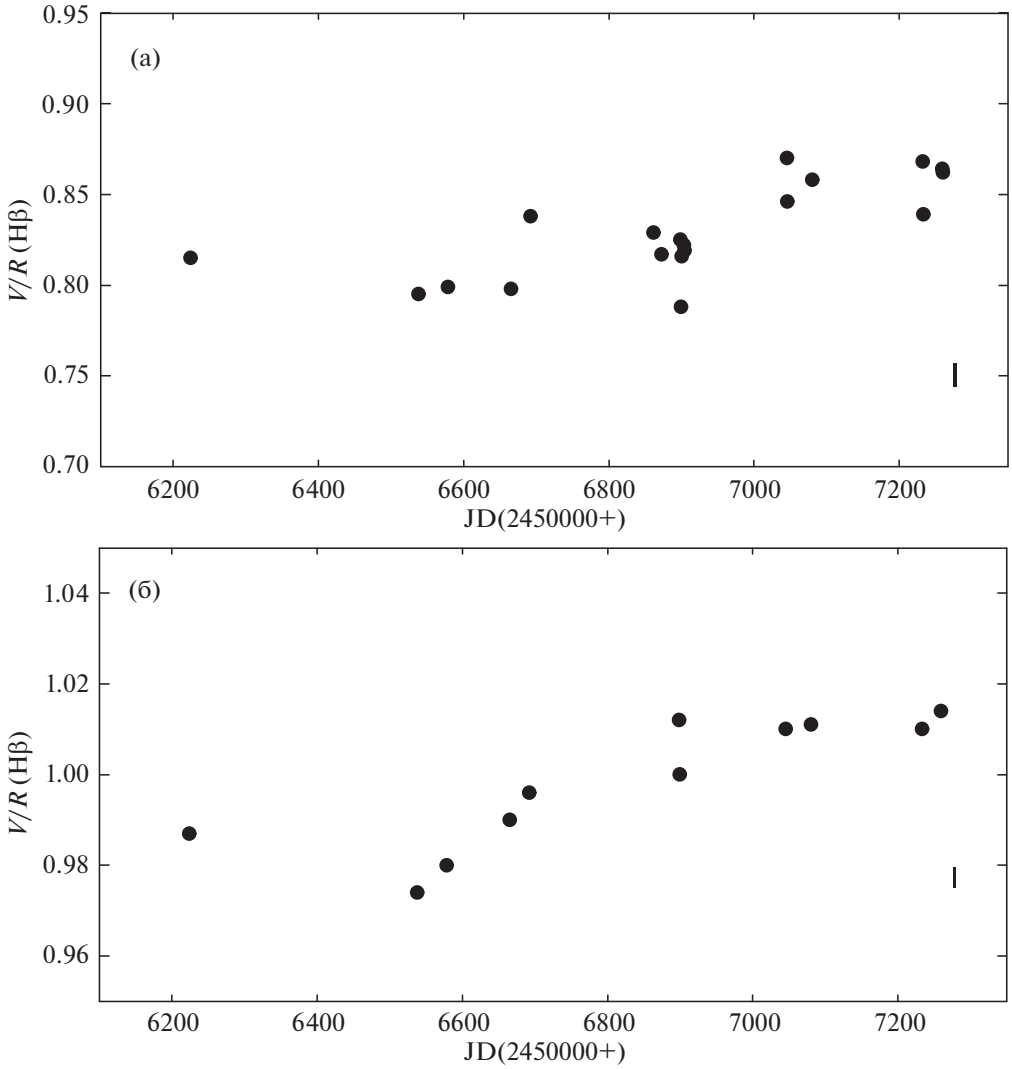

Рис. 4. Долговременная переменность параметра V/R эмиссионного профиля линии Hβ у Be-звезд: (а) — NGC 581–76, (б) — NGC 581–87. Вертикальная черточка в правом нижнем углу каждого графика отражает погрешность измерения параметра V/R.

сионного спектра, так и параметра V/R. Для звезды 49 было получено несколько спектров, и, как видно на рис. 3а, эмиссионная компонента профиля линии Hβ показывает заметные вариации интенсивностей и их отношения. Для звезды 76 было получено наиболее значительное количество спектров. На рис. 3б эмиссионный профиль линии Hβ всегда оставался двухкомпонентным со значительными вариациями интенсивностей компонент V и R. Кроме того, особенно выделялась переменность центральной абсорбционной компоненты от сезона к сезону. На рис. 4а представлена долговременная переменность параметра V/R для этой звезды. Как видно на рисунке, данный параметр имел заметную переменность в течение каждого из сезонов наблюдений, и хорошо заметна долговременная переменность с возможным характерным временем в несколько лет, заметно превосходящая точность измерения указанного параметра ~0.015. Данный вид переменности характерен для оболочек Be-звезд и обычно объясняется неустойчивостью геометрически тонких и протяженных дисков (Ривиниус и др., 2013). Как видно на рис. 3в, профиль линии Hβ у звезды 87 имеет слабо выраженную двухкомпонентную структуру с небольшой переменностью интенсивностей эмиссионных пиков от сезона к сезону. Переменность параметра V/R сходна с переменностью у звезды 76, хотя и имеет существенно меньшую амплитуду (рис. 4б), тем не менее превосходящую погрешность в ~0.015. Поэтому можно утверждать, что в оболочке звезды также присутствуют неоднородности в плотности, прецессирующие в диске с характерным временем в несколько лет. Количество спектров, полученных

для звезды V1122 Cas, не столь велико, профиль линии Hβ в течение всего периода наблюдений оставался широким однокомпонентным с заметными вариациями его интенсивности от сезона к сезону (рис. 3г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Молодое рассеянное звездное скопление NGC 581, несмотря на относительно высокую яркость горячих звезд, остается все еще недостаточно исследованным. Наблюдается недопустимо значительный разброс в оценках его возраста. Для его уточнения в работе выполнены спектроскопические исследования с умеренным разрешением B-звезд. Для определения эффективной температуры данных объектов применен дифференциальный метод, основанный на точном определении физических параметров атмосфер стандартных звезд и построении простых зависимостей изменения ряда спектроскопических параметров с изменением их температуры в предположении, что параметр $\log g$ известен и примерно соответствует возрасту, определенному из фотометрических наблюдений. Данная методика позволила с хорошей точностью ($\sim$500°) определить температуры B-звезд и оценить с существенно более низкой точностью ($\sim$2000°) температуры Be-звезд. Подобная методика в определении температур звезд с приблизительно известным эволюционным статусом оказалась более предпочтительной, чем прямое определение параметров атмосфер на основе моделей атмосфер, по спектрам более высокого разрешения, но с ограниченным набором используемых линий. Нахождение значений $T_{\rm eff}$ для B-звезд скопления позволило с высокой точностью определить возраст скопления $t = 22 \pm \pm 1$ млн лет и модуль расстояния $(m - M)_0 = = 12.4^m$. Данные оценки совпадают с полученными ранее по результатам широкополосной фотометрии и имеют заметно более высокую точность. Попытка уточнить расстояния до скопления с использованием прямых измерений параллаксов изучаемых звезд по данным телескопа Gaia показала все еще недостаточную точность для достаточно удаленных и относительно слабых объектов.

Исследованная нами нестационарность эмиссионного спектра четырех Be-звезд скопления не выявила значительных аномалий как в самом эмиссионном спектре исследуемых объектов, так и в долговременной переменности профилей ярких линий. Все звезды демонстрировали долговременную переменность профилей и интенсивности линий от сезона к сезону. Две наиболее изученных Be-звезды NGC 581–76 и NGC 581–87 показали обычную волнообразную, возможно, квазипериодическую переменность отношения интенсивностей эмиссионных пиков V/R с характерными временами в несколько сотен дней.

Автор выражает глубокую благодарность анонимному рецензенту за детальный анализ текста статьи, существенно повлиявший на качество представления материала и сделанные выводы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брессан и др. (A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C.D. Cero, S. Rubele, and A. Nanni), MNRAS **427**, 127 (2012).
2. Группа Гая и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, et al.), Astron. Astrophys. **616**, A1 (2018).
3. Дамбис и др. (A.K. Dambis, E.V. Glushkova, L.N. Berdnikov, and Y.C. Joshi), MNRAS **465**, 1505 (2017).
4. Кантат-Гаудин и др. (T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bragaglia, et al.), Astron. Astrophys. **618**, A93 (2018).
5. Лиу и др. (T. Liu, K.A. Janes, and T.M. Bania), Astron. J. **98**, 626 (1989).
6. Любимков и др. (S.L. Lyubimkov, D.L. Lambert, T.M. Rachkovskaya, S.I. Rostopchin, A.E. Tarasov, D.B. Poklad, V.M. Larionov, and L.V. Larionova), MNRAS **316**, 19 (2000).
7. Любимков и др. (S.L. Lyubimkov, T.M. Rachkovskaya, S.I. Rostopchin, and D.L. Lambert), MNRAS **333**, 9 (2002).
8. Мэтью и др. (B. Mathew, A. Subramaniam, and B.C. Bhatt), MNRAS **388**, 1879 (2008).
9. Ривиниус и др. (T. Rivinius, A.C. Carciofi, and C. Martayan), Astron. Astrophys. Rev. **21**, 69 (2013).
10. Сагар, Джоши (R. Sagar and U.C. Joshi), Bull. Astron. Soc. India **6**, 12 (1978).
11. Саннер и др. (J. Sanner, M. Geffert, J. Brunzendeorf, and J. Schmoll), Astron. Astrophys. **349**, 448 (1999).
12. Тарасов (А.Е. Тарасов), Астрофизика **60**, 291 (2017).
13. Тарасов (А.Е. Тарасов, С.Л. Мальченко, Письма Астрон. журн. **38**, 486 (2012) [A.E. Tarasov and S.L. Malchenk, Astron. Lett. **38**, 428 (2012)].
14. Тарасов (А.Е. Тарасов, С.Л. Мальченко, К. Якут), Письма Астрон. журн. **42**, 741 (2016) [A.E. Tarasov et al., Astron. Lett. **42**, 674 (2016)].
15. Фелпс, Джанес (R.L. Phelps and K.A. Janes), Astrophys. J. Suppl. Ser. **90**, 31 (1994).
16. Хербиг (G.H. Herbig), Astrophys. J. **196**, 129 (1975).
17. Хоаг и др. (A.A. Hoag, H.L. Johnson, B. Iriarte, R.I. Mitchell, K.L. Hallam, and S. Sharpless), Publ. Naval. Observ. **17**, 346 (1961).
18. Хуанг и др. (W. Huang, D.R. Gies, and M.V. McSwain), Astrophys. J. **722**, 605 (2010).