

УДК 524.47; 524.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СПЕКТРОВ ЧЕТЫРЕХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ М 31

© 2021 М. И. Маричева^{1*}¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 22 июня 2021 года; после доработки 9 августа 2021 года; принята к публикации 9 августа 2021 года

Представлены результаты определения металличности, возраста, удельного содержания гелия (Y) и содержаний элементов C, N, Mg, Ca, Mn, Ti и Cr по спектрам умеренного разрешения для четырех шаровых скоплений галактики М 31: Vol 6, Vol 20, Vol 45 и Vol 50. Химический состав для Vol 20 и Vol 50 и Y для четырех скоплений определены впервые. Спектры исследуемых объектов были получены на 6-м телескопе БТА САО РАН в 2020 г. Все исследуемые скопления оказались старше 11 млрд. лет. Определенные значения металличности [Fe/H] находятся в диапазоне от -1.1 до -0.75 dex. Они ниже, чем металличность звезд гало М 31 на данном расстоянии от центра галактики ($R_{M31} < 10$ кпс). Содержания элементов α -процесса $[\alpha/Fe] = ([O/Fe] + [Mg/Fe] + [Ca/Fe])/3$ у четырех скоплений соответствуют таковым у звезд внутреннего гало М 31.

Ключевые слова: шаровые скопления: общие — шаровые скопления: индивидуальные: Vol 6, Vol 20, Vol 45, Vol 50 — галактики: индивидуальные: М 31

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение систем шаровых скоплений галактик дает ключ к разгадке эволюции и процессов звездообразования в них. М 31 является ближайшей к Млечному Пути спиральной галактикой. Исследование ее звездных скоплений представляет большой интерес. Система шаровых скоплений М 31 — одна из наиболее изученных (см., например, Mackey et al. (2019), McConnachie et al. (2018), Caldwell et al. (2016) и ссылки в этих статьях). Однако глубокие диаграммы «цвет—звездная величина» (CMD) шаровых скоплений М 31, достигающие точки поворота Главной последовательности (MS), до сих пор не удалось получить с помощью наблюдений ни на космическом телескопе им. Хаббла (HST), ни на крупнейших наземных телескопах из-за удаленности М 31 (согласно выводам Riess et al. (2016), расстояние до М 31 $D_{M31} = 0.745 \pm 0.028$ Мпс) и высокой плотности звезд в шаровых скоплениях, что затрудняет фотометрию (см. статью Federici et al. (2012) и ссылки в ней). В литературных источниках представлены в основном интегральные характеристики шаровых скоплений в М 31 (цвета, спектры) с целью определения их возраста и металличности путем сравнения с моделями простых звездных населений (см., например, Cezario et al. (2013), Fan et al. (2016), Caldwell

et al. (2009), Wang et al. (2019)). Спектроскопия высокого разрешения ($R > 20\,000$) суммарного излучения ярких скоплений в М 31 была выполнена в работах Colucci et al. (2014) и Sakari et al. (2016). Как отмечает Sakari et al. (2014), исследование интегральных спектров скоплений высокого спектрального разрешения зачастую не дает больших преимуществ по сравнению с методами спектроскопии умеренного разрешения ($R < 5000$), так как для уверенного определения содержаний элементов необходимо накопление большого сигнала в спектрах, что невыполнимо при высоком разрешении, поскольку требует значительного наблюдательного времени. Даже при определении содержания железа, которое имеет наибольшее число линий в спектрах по сравнению с другими элементами, ошибки измерения по спектрам высокого разрешения оказываются порядка 0.1–0.4 dex.

Данная работа посвящена исследованию интегральных спектров умеренного разрешения четырех ярких шаровых скоплений М 31: Vol 6, Vol 20, Vol 45 и Vol 50. Все исследуемые объекты, кроме Vol 50, были впервые открыты Хабблом (Hubble 1932) как вероятные кандидаты в шаровые скопления. Vol 50 был обнаружен Бааде и впервые упоминается в работе Seyfert and Nassau (1945). Все эти объекты входят в каталог Galletti et al. (2004). Основные свойства скоплений перечислены в таблице 1: в первом столбце приведены

*E-mail: marichevar@gmail.com

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых скоплений

| Object | RA DEC (2000) | | V , mag | $E(B - V)^a$, mag | Vel^a , $km\ s^{-1}$ | R_{M31}^b , kps | R_h^c , ps |
|--------|---------------|-------------|--------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|-----------------|
| | hh:mm:ss | gr:mm:ss | | | | | |
| Bol 6 | 00:40:26.47 | +41:27:26.6 | 15.97 | 0.17 | -232.4 + 6 | 6.3 | 1.86 |
| Bol 20 | 00:40:55.26 | +41:41:25.3 | 16.13 | 0.11 | -345.4 + 5 | 7.3 | 3.17 |
| Bol 45 | 00:41:43.11 | +41:34:20.1 | 15.14 | 0.18 | -419.4 + 6 | 4.8 | 2.85 |
| Bol 50 | 00:41:46.27 | +41:32:18.4 | 16.79 | 0.25 | -109.5 + 6 | 4.4 | — |

a — Caldwell et al. (2011); b — Caldwell et al. (2016); c — Barmby et al. (2007)

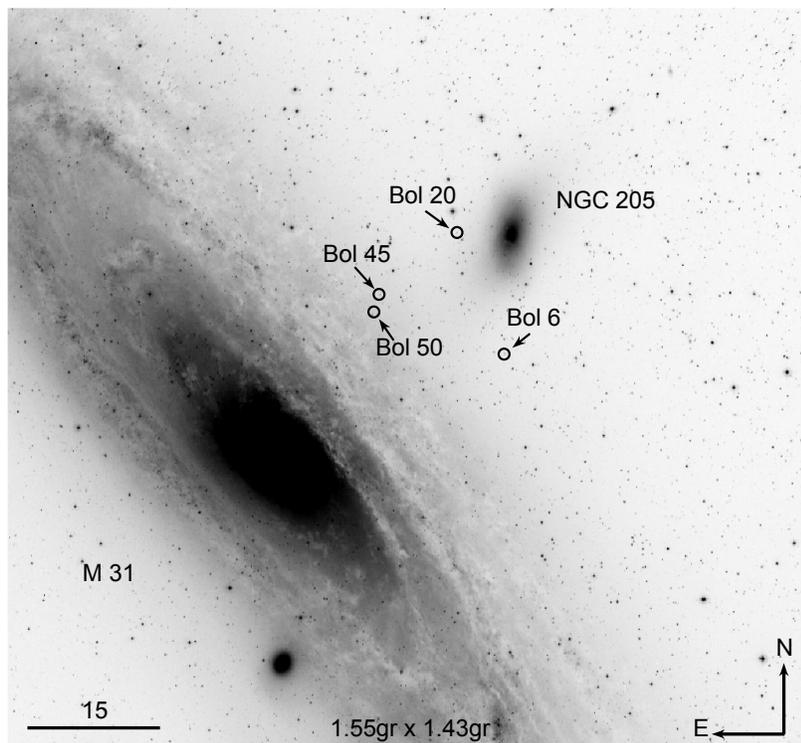


Рис. 1. Положение исследуемых скоплений в проекции на небесную сферу на кадре цифрового обзора неба DSS.

идентификаторы из Galleti et al. (2004), далее — прямые восхождения и склонения, видимые звездные величины в фильтре V фотометрической системы Джонсона—Казинса, избытки цвета $E(B - V)^1$, лучевые скорости, проекционные расстояния от центра M31, радиусы на половине светимости. Скопления имеют близкие небесные координаты, однако их лучевые скорости различны. Объекты

расположены в области неба между M31 и ее спутником — карликовой эллиптической галактикой NGC 205 (рис. 1, кадр цифрового обзора неба DSS²), находящейся на расстоянии 0.824 Мпс от Солнца, согласно McConnachie et al. (2005).

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Спектры суммарного излучения всех четырех объектов были получены на 6-м телескопе БТА

¹ $E(B - V) = A_B - A_V$, где A_B и A_V — поглощение света в звездных величинах в фильтрах B и V соответственно. Согласно Schlegel et al. (1998), $A_V = 3.315 E(B - V)$, $A_I = 1.940 E(B - V)$.

²http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form

Таблица 2. Журнал наблюдений на телескопе БТА

| Object | t_{exp} , с | S/N (4500 Å) | Seeing |
|--------|----------------------|----------------|--------|
| Bol 6 | 3×900 | 75 | 2''5 |
| Bol 20 | 3×900 | 100 | 1''5 |
| Bol 45 | 3×600 | 121 | 2''5 |
| Bol 50 | 3×900 | 56 | 1''5 |

САО РАН 19 сентября 2020 г. по программе М. Е. Шариной «Свойства звездных населений внегалактических шаровых скоплений». Наблюдения проводились с помощью фокального редуктора первичного фокуса SCORPIO-1 (Afanasiev and Moiseev 2005) в режиме спектроскопии с длинной щелью. Использовалась гризма VPHG1200B, которая обеспечивает спектральный диапазон 3600–5400 Å и разрешение (ширину на половине интенсивности спектрального профиля) $FWHM \sim 5.5$ Å. Ширина щели была выбрана 1''. Журнал наблюдений представлен в таблице 2, в которой напротив наименования объекта указаны суммарные времена экспозиций, отношения сигнал-шум S/N на пиксель на длине волны, полученные в результирующих суммарных одномерных спектрах, и качество изображения.

Редукция длиннощелевых спектров выполнена с помощью пакетов программ MIDAS (Banse et al. 1983) и IRAF (Tody 1993). Очистка кадров от космических частиц и линейаризация по спектрам лампы He-Ne-Ag выполнялись в MIDAS. Дисперсионное соотношение обеспечивало точность калибровки длин волн порядка 0.16 Å. Вычитание фона неба выполнялось в IRAF с использованием процедуры `background`. Одномерные спектры извлекались в IRAF с помощью процедуры `apsum` с корректировкой кривизны спектра вдоль дисперсии.

Для увеличения отношения S/N полученные одномерные спектры суммировались с соответствующими спектрами интегрального излучения скоплений Bol 6, Bol 20, Bol 45 и Bol 50 из наблюдательного архива Nectospec спектрографа 6.5-м телескопа MMT (Fabricant et al. 2005), которые были сняты с решеткой 270 штрих/мм с дисперсией 1.21 Å/пиксель в спектральном диапазоне 3650–9200 Å и имеют разрешение $FWHM \sim 5$ Å. Эти спектры были использованы Caldwell et al. (2009; 2011) для исследования возраста, металличности и кинематических характеристик скоплений в М 31. При суммировании с нашими спектрами были приведены к одному спектральному разрешению

в зависимости от длины волны. В результате отношение S/N в полученных суммарных спектрах скоплений варьируется от 100 для Bol 50 до 280 для Bol 20 на длине волны 4500 Å. Определение зависимости спектрального разрешения от длины волны и сглаживание спектров до необходимого разрешения выполнялось с учетом функции рассеяния линии в спектрографе (line spread function, LSF) с помощью пакета программ Лионского университета UlySS (Koleva et al. 2008; 2009). UlySS — это пакет с открытым исходным кодом, который позволяет сопоставлять наблюдаемый и модельный спектры путем нелинейной минимизации их разницы методом наименьших квадратов. Программа UlySS также выполняет нормализацию спектра путем введения мультипликативного полинома для масштабирования модельного спектра. На веб-странице UlySS дается пример способа построения LSF³. Примеры построенной в данной работе LSF для наблюдений со спектрографами SCORPIO-I и Nectospec приведены на сайте САО⁴.

3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА, УДЕЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Метод разработан и подробно описан Sharina et al. (2020) (см. также ссылки в данной работе). Он применяется для определения возраста, удельного содержания гелия (Y) и химического состава старых шаровых скоплений нашей и других галактик (см., например, Sharina et al. (2020; 2018)).

В рамках данного метода синтетические спектры суммарного излучения звезд скоплений рассчитывают, согласно параметрам атмосфер, задаваемым изохронами звездной эволюции. Спектры отдельных звезд рассчитываются с помощью программы CLUSTER (Sharina et al. (2020) и ссылки в ней) в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) на основе плоскопараллельных гидростатических моделей атмосфер (Castelli and Kurucz 2003) с использованием списков Kurucz⁵ атомарных и молекулярных линий. Синтетические спектры отдельных звезд складываются, согласно заданной функции масс. В данной работе используются функция масс Chabrier (2005) и изохроны Bertelli et al. (2008) и Pietrinfermi et al. (2004) (далее: B08 и P04). Эти модели звездной эволюции включают стадии горизонтальной (НВ)

³http://ulyss.univ-lyon1.fr/tuto_base.html

⁴<ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/GC4M31/lst/>

⁵<http://kurucz.harvard.edu/linelists.html>

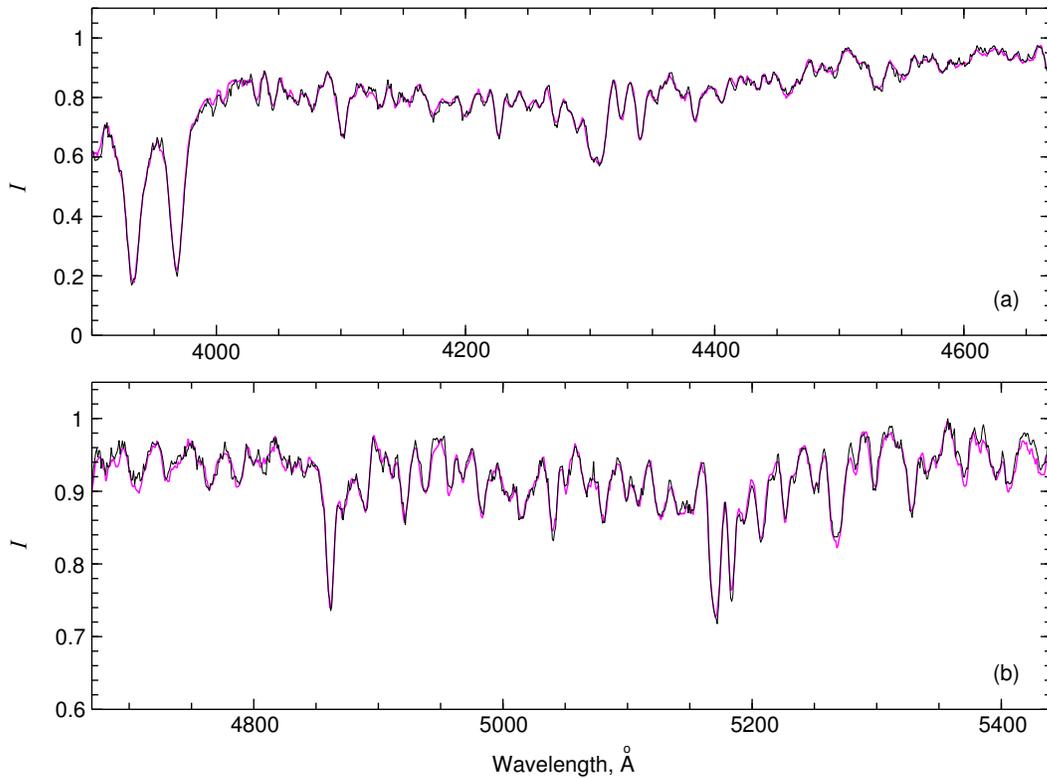


Рис. 2. Сравнение полного спектра скопления Bol 45 со спектром скопления Bol 50 (розовая и черная линии соответственно).

Таблица 3. Результаты определения металличности и содержаний химических элементов методом популяционного синтеза для изохрон B08

| Object | Isochrone (Z, Y, lg(Age)) | [Fe/H], | [C/Fe], | [N/Fe], | [Mg/Fe], | [Ca/Fe], | [Mn/Fe], | [Ti/Fe], | [Cr/Fe], |
|---------------|------------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | dex | dex | dex | dex | dex | dex | dex | dex |
| Bol 6 | 0.004, 0.30, 10.05 | -0.75 | 0.2 | 1.55 | 0.67 | 0.55 | -0.5 | 0.1 | 0.0 |
| Bol 45/Bol 50 | 0.001, 0.26, 10.05 | -1.1 | 0.3 | 0.7 | 0.65 | 0.5 | -0.5 | 0.2 | 0.0 |
| | 0.002, 0.26, 10.10 | | 0.03 | 0.7 | 0.5 | 0.2 | -0.3 | 0.1 | -0.1 |
| Bol 20 | 0.002, 0.26, 10.15 | -1.0 | 0.05 | 1.4 | 0.5 | 0.38 | -0.5 | 0.2 | 0.0 |

Таблица 4. Результаты определения металличности и содержаний химических элементов методом популяционного синтеза для изохрон P04

| Object | Isochrone (Z, Y, Age (Gyr)) | [Fe/H], | [C/Fe], | [N/Fe], | [Mg/Fe], | [Ca/Fe], | [Mn/Fe], | [Ti/Fe], | [Cr/Fe], |
|---------------|--------------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | dex | dex | dex | dex | dex | dex | dex | dex |
| Bol 6 | 0.004, 0.25, 14 | -0.75 | 0.0 | 1.35 | 0.52 | 0.43 | -0.5 | 0.23 | -0.05 |
| Bol 45/Bol 50 | 0.002, 0.25, 10 | -1.1 | 0.1 | 0.7 | 0.6 | 0.4 | -0.3 | 0.2 | 0.0 |
| | 0.002, 0.25, 10.5 | | 0.23 | 0.7 | 0.6 | 0.45 | -0.35 | 0.3 | -0.1 |
| | 0.002, 0.25, 11 | | 0.36 | 0.7 | 0.65 | 0.48 | -0.4 | 0.27 | 0.0 |
| Bol 20 | 0.002, 0.25, 12 | -1.0 | 0.15 | 1.3 | 0.5 | 0.5 | -0.6 | 0.2 | 0.1 |

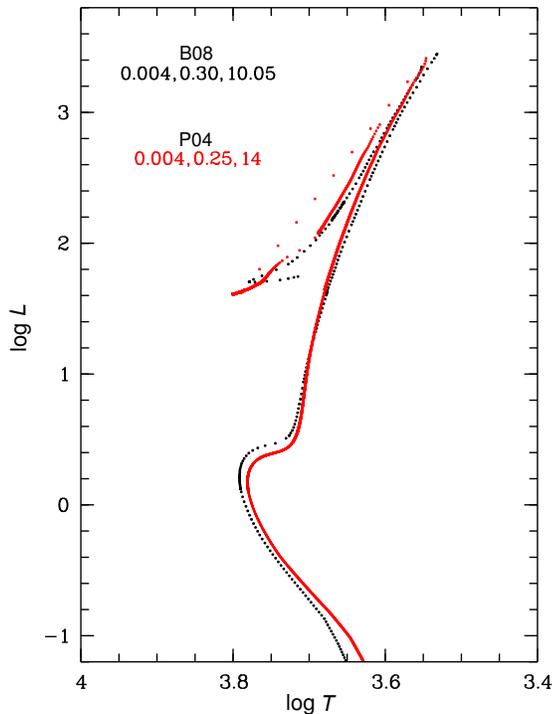


Рис. 3. Сравнение изохрон B08 ($Z=0.004$, $Y=0.30$, $\lg(\text{Age})=10.05$) и P04 ($Z=0.004$, $Y=0.25$, $\text{Age}=14$ млрд. лет), использованных для моделирования спектра Vol 6.

и асимптотической (AGB) ветвей наряду с остальными основными стадиями эволюции звезд. Диапазоны изменения параметров в моделях B08 следующие: металличность⁶ $0.0001 \leq Z \leq 0.070$, логарифм возраста $8.5 \leq \lg(\text{Age}) \leq 10.15$ с шагом 0.05 и удельное содержание гелия $Y=0.23, 0.26, 0.30$. Диапазоны изменения параметров в моделях P04 следующие: металличность $0.0001 \leq Z \leq 0.04$ и возраст $30 \text{ млн. лет} \leq \text{Age} \leq 15 \text{ млрд. лет}$ с шагом 0.01 млрд. лет для моделей $\text{Age} < 1$ млрд. лет и 0.5 млрд. лет для моделей старше 1 млрд. лет. Изохроны P04 имеют фиксированное значение удельного содержания гелия, связанное с металличностью ($dY/dZ \sim 1.4$ при $Y_{\odot} = 0.2734$, $Z_{\odot} = 0.0198$).

Для определения возраста, Y и содержаний элементов выполняется попиксельное сравнение модельного спектра и нормированного к модельному наблюдаемого спектра. По форме и глубине водородных линий бальмеровской серии, а так же

⁶Содержание железа в солнечных единицах: $[\text{Fe}/\text{H}] = \lg(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}) - \lg(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\odot}$, где $N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}$ — отношение концентраций железа и водорода по числу атомов, или по массе. Массовые доли водорода X , гелия Y , и металлов Z для Солнца даны в статье Asplund et al. (2009): $X+Y+Z=1$.

с учетом баланса линий кальция Ca I 4227 Å и линий K и H Ca II 3933.7 Å и 3968.5 Å (в линию H Ca II вносит вклад линия водорода Hε) подбирается изохрона. При изменении металличности, возраста и Y глубина ядер и крыльев каждой из водородных линий Hδ, Hγ и Hβ изменяются по-разному из-за различного вклада звезд разной светимости и спектральных классов в зависимости от длины волны. Этот факт позволяет достаточно уверенно определять металличность, возраст и Y . С данным спектральным разрешением наиболее точно удается подобрать содержания для Ca, Mg и Fe, менее уверенно — для C, N, Mn, Ti и Cr (см. Sharina et al. (2013)). Типичные ошибки измерения содержаний приведены в статье Sharina et al. (2020).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Методом, описанным в предыдущем разделе, определены возраст, металличность $[\text{Fe}/\text{H}]$, Y и содержания химических элементов исследуемых объектов. В таблицах 3 и 4 приведены результаты определения параметров изохрон B08 и P04, используемых при моделировании спектров, а также соответствующие содержания химических элементов. Во второй колонке каждой из таблиц приведены параметры используемых изохрон: металличность Z , удельное содержание гелия Y и возраст в млрд. лет. Содержание $[\text{O}/\text{Fe}]$ для всех объектов принималось равным 0.3 dex, так как для него нет наблюдательных деталей в исследуемом спектральном диапазоне, однако оно влияет на молекулярное и ионизационное равновесие других элементов, в частности, C и N.

Скопления Vol 45 и Vol 50 имеют практически идентичные спектры (рис. 2), поэтому их химический состав и используемые для построения модельных спектров изохроны подобраны одинаковыми (таблицы 3 и 4). Как следует из таблиц, спектр скопления может быть описан разными моделями звездной эволюции. Содержания химических элементов несколько варьируются в зависимости от выбора изохроны. Для разной металличности, Y и возраста меняется относительный вклад звезд HB, точки поворота MS и вершины красных гигантов (TRGB), что влияет на глубину и форму атомарных и молекулярных линий. Сравнение изохрон, использованных для моделирования спектра Vol 6, показано на рис. 3. По осям X и Y соответственно отложены логарифм эффективной температуры T_{eff} в Кельвинах и логарифм светимости L в светимостях Солнца. В случае Vol 6 (рис. 3) отличие по температуре и светимости в точке поворота MS моделей звездной эволюции, обеспечивающих наилучшее соответствие между синтетическими и наблюдательными спектрами:

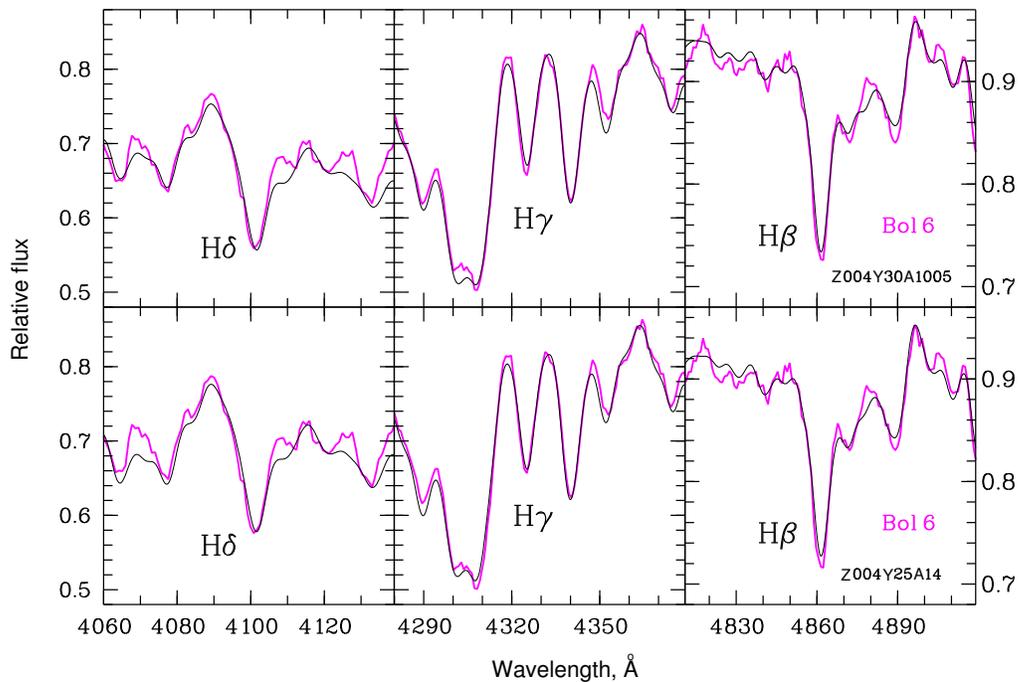


Рис. 4. Сравнение спектра скопления Bol 6 (розовая линия) с модельным в области водородных линий. Верхняя панель: модельный спектр, рассчитанный с изохроной B08: $Z=0.004$, $Y=0.30$, $\log(\text{Age}) = 10.05$; нижняя панель — с изохроной P04: $Z=0.004$, $Y=0.25$, Age=14 млрд. лет.

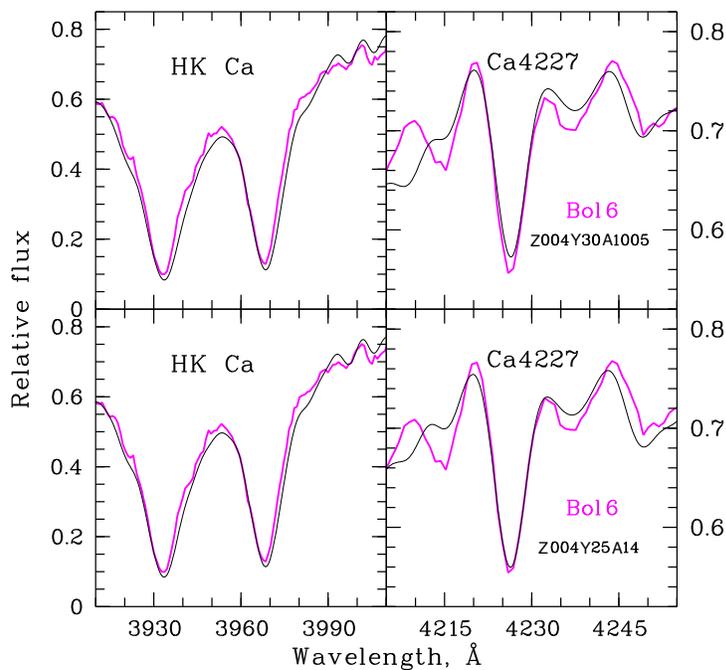


Рис. 5. Сравнение спектра скопления Bol 6 (розовая линия) с модельным в области линий Ca II K и H и Ca I 4227 Å. Верхняя панель: модельный спектр, рассчитанный с изохроной B08: $Z=0.004$, $Y=0.30$, $\log(\text{Age}) = 10.05$; нижняя панель — с изохроной P04: $Z=0.004$, $Y=0.25$, Age=14 млрд. лет.

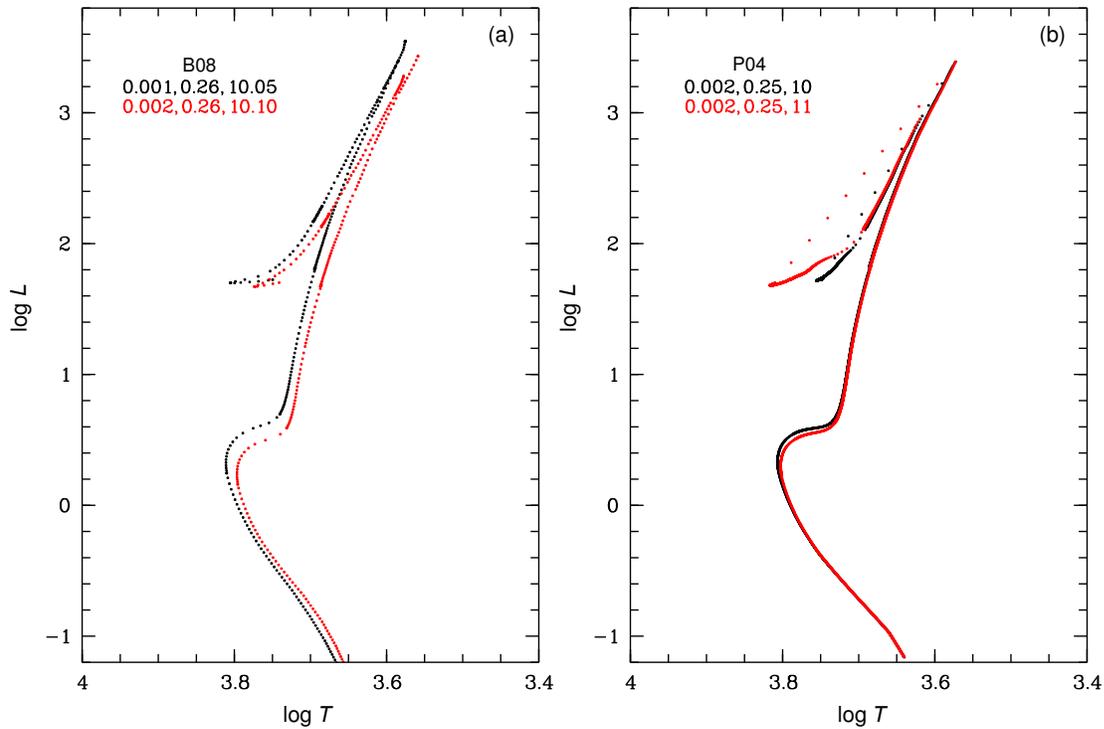


Рис. 6. (а) сравнение изохрон B08: $Z=0.001$, $Y=0.26$, $\lg(\text{Age}) = 10.05$ и $Z=0.002$, $Y=0.26$, $\lg(\text{Age}) = 10.10$. (б) сравнение изохрон P04: $Z=0.002$, $Y=0.25$, $\text{Age}=10$ млрд. лет и $Z=0.002$, $Y=0.25$, $\text{Age}=11$ млрд. лет, использованных для моделирования спектров Bol 45 и Bol 50.

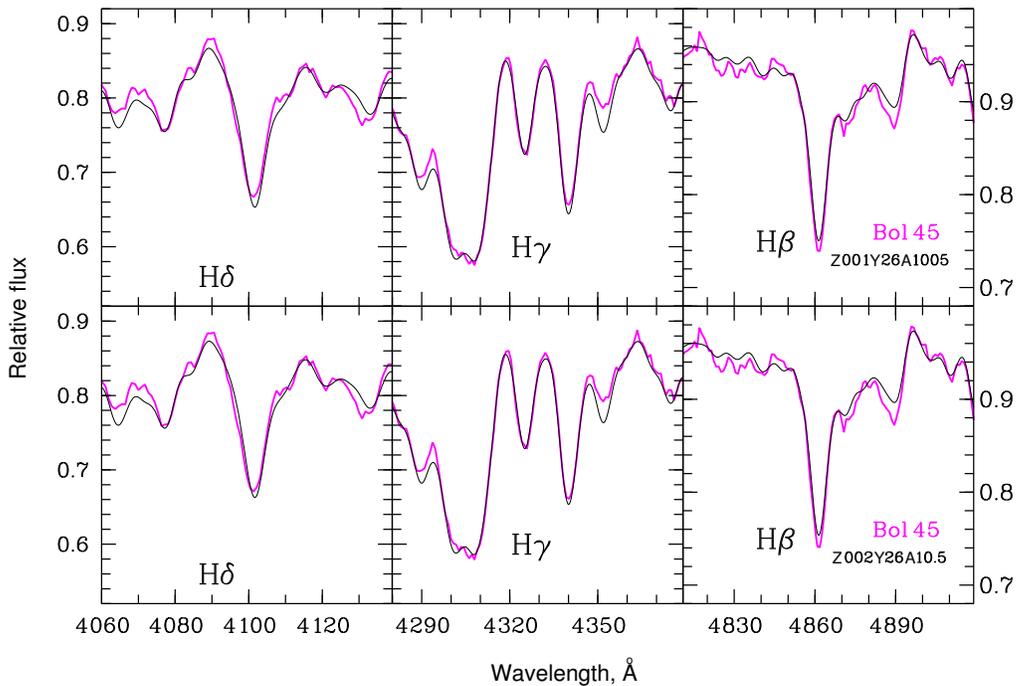


Рис. 7. Сравнение спектра скопления Bol 45 (розовая линия) с модельным в области водородных линий. Верхняя панель: модельный спектр, рассчитанный с изохроной B08: $Z=0.001$, $Y=0.26$, $\lg(\text{Age}) = 10.05$; нижняя панель — с изохроной P04: $Z=0.002$, $Y=0.25$, $\text{Age}=10.5$ млрд. лет.

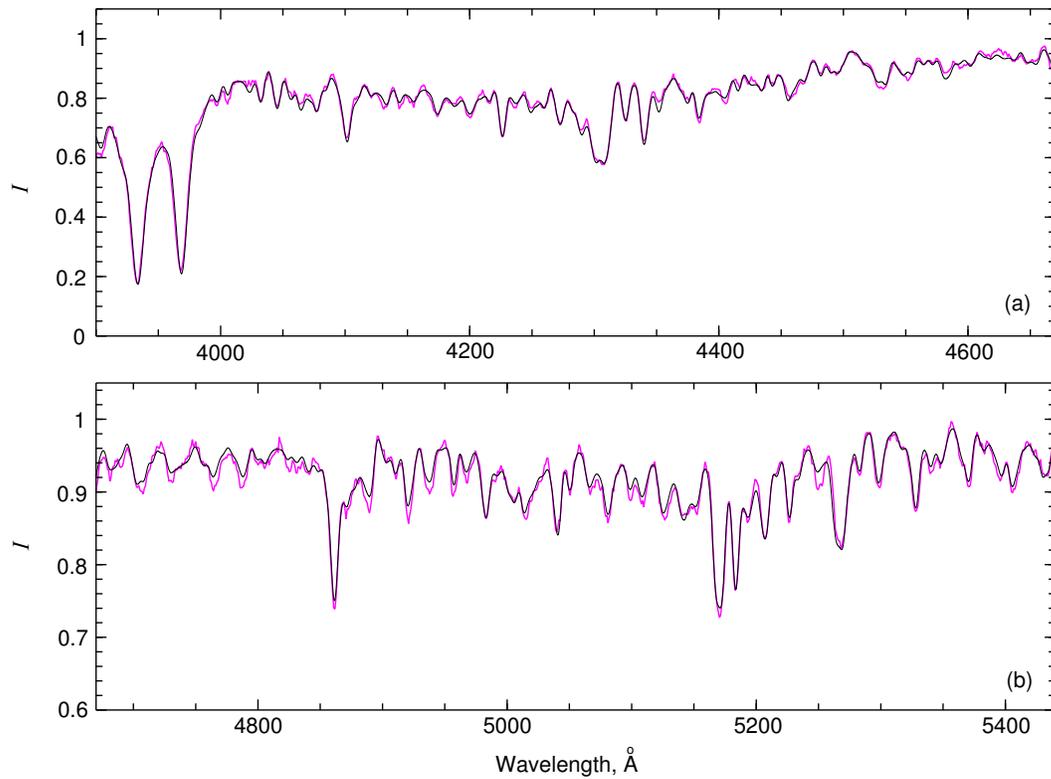


Рис. 8. Сравнение спектра скопления Vol 45 с модельным, построенным с использованием изохроны B08: $Z=0.001$, $Y=0.26$, $\lg(\text{Age}) = 10.05$ (розовая и черная линии соответственно).

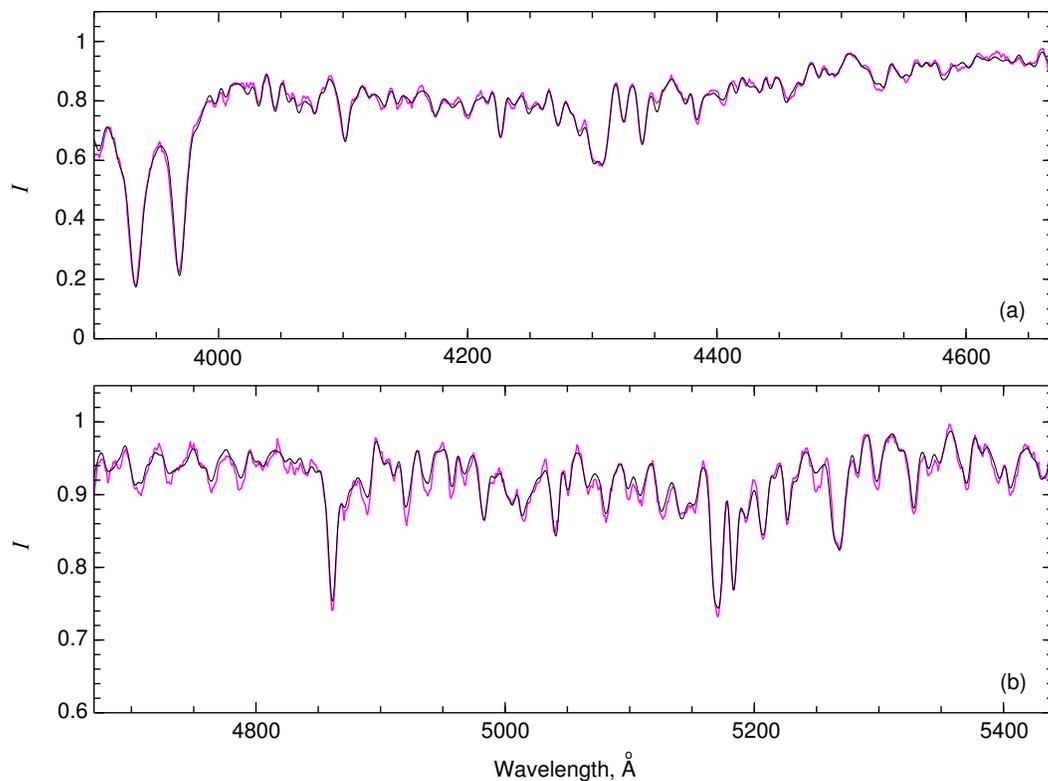


Рис. 9. Сравнение спектра скопления Vol 45 с модельным, построенным с использованием изохроны P04: $Z=0.002$, $Y=25$, $\text{Age}=10.5$ млрд. лет. (розовая и черная линии соответственно).

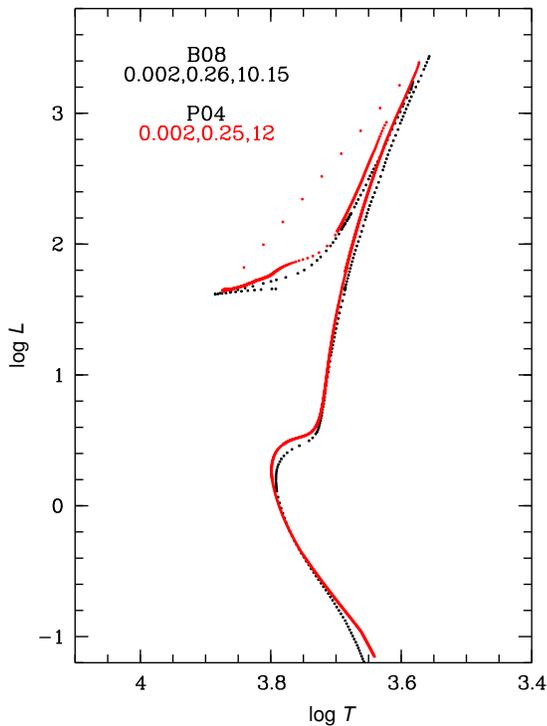


Рис. 10. Сравнение изохрон B08 ($Z=0.002$, $Y=0.26$, $\lg(\text{Age}) = 10.15$) и P04 ($Z=0.002$, $Y=0.25$, $\text{Age}=12$ млрд. лет), использованных для построения синтетического спектра Vol 20.

$$\Delta T = 10^{\lg T_1} - 10^{\lg T_2} = 140 \text{ K},$$

$$\Delta L = 10^{\lg L_1} - 10^{\lg L_2} = 0.22 L_{\odot}.$$

На рис. 4 и 5 показано сравнение модельных спектров с наблюдаемыми для Vol 6 в области водородных линий и линий К и Н Ca II 3933.7 Å и 3968.5 Å. Видно, что модель 0.004, 0.30, 10.05 предпочтительнее при писании профиля линии H β , но изохрона 0.004, 0.25, 14 лучше описывает баланс линий кальция. Неопределенность в оценке возраста и Y в данном случае обусловлена выбором теоретической изохроны звездной эволюции для построения синтетического спектра. Окончательный выбор между изохронами сделан на основе сравнения изохрон с наблюдаемым распределением звезд на CMD (раздел 5.1).

Сравнение изохрон, использованных для моделирования спектров Vol 45 и Vol 50, показано на рис. 6. Отличие по температуре и светимости для «голубого» конца НВ у изохрон P04 $\Delta T = 961 \text{ K}$, $\Delta L = 3.5 L_{\odot}$. Изохроны B08 имеют следующие отличия по температуре и светимости для «голубого» конца НВ: $\Delta T = 421 \text{ K}$, $\Delta L = 3.3 L_{\odot}$ и для звезд точки поворота MS: $\Delta T = 291 \text{ K}$, $\Delta L = 0.17 L_{\odot}$. Для Vol 45 и Vol 50 все использованные модели звездной эволюции дают практически одинаковые оценки [Fe/H] при сравнении построенных синте-

тических спектров с наблюдаемыми. Однако содержания других химических элементов отличаются в зависимости от выбора изохроны (таблицы 3 и 4). Синтетические спектры (рис. 7, 8 и 9), построенные с выбранными изохронами P04, лучше описывают водородные линии в наблюдаемых спектрах Vol 45 и Vol 50 и дают близкие оценки возраста и меньший разброс по определяемым содержаниям химических элементов. Наилучшее описание линий обеспечивает изохрона $Z=0.002$, $Y=0.25$, $\text{Age}=10.5$ млрд. лет. Наиболее оптимальным вариантом среди изохрон B08 является изохрона с параметрами $Z=0.001$, $Y=0.26$, $\lg(\text{Age}) = 10.05$.

В случае Vol 20 изохроны B08 и P04, подобранные в процессе моделирования спектров (рис. 10, 11, 12 и соответствующие данные в таблицах 3 и 4), позволяют хорошо описать наблюдаемые спектры. Сравнение между этими изохронами (рис. 10) показывает, что отличия между ними по температуре и светимости для «голубого» конца НВ составляют $\Delta T = 140 \text{ K}$, $\Delta L = 2.9 L_{\odot}$ и для точки поворота MS — $\Delta T = 143 \text{ K}$, $\Delta L = 0.18 L_{\odot}$.

Сравнение полных спектров четырех исследуемых скоплений друг с другом, а также их сравнение в области водородных линий приведено на сайте⁷. Сравнение подтверждает сделанные в этом разделе выводы: у Vol 20 наиболее интенсивные водородные линии по сравнению с остальными объектами. Оно старше остальных скоплений выборки. Vol 6 — самый высокометаллический объект выборки. По возрасту он близок к Vol 45 и Vol 50, так как форма и интенсивность водородных линий у этих трех скоплений почти одинаковы.

Сравнение же спектров четырех скоплений с спектрами шаровых скоплений Галактики из Schiavon et al. (2005), сглаженных до разрешения $FWHM = 5.5 \text{ Å}$, используемого в данной работе, не выявило объектов с полностью идентичными характеристиками: возрастом, металличностью и Y. Сравнение спектров приведено на сайте^{8, 9}. Скопления Галактики с наиболее похожими возрастом, Y и химическим составом: NGC 6362 и NGC 6652 — для Vol 6, NGC 6637, NGC 6638 и NGC 6342 — для Vol 45 и Vol 50.

5. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ С ЛИТЕРАТУРНЫМИ ДАННЫМИ

В таблице 5 подведен итог настоящего исследования интегральных спектров четырех скоплений

⁷ <ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/GC4M31/>

⁸ <ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/GC4M31/bo16/> для Vol 6.

⁹ <ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/GC4M31/bo145/> для Vol 45 и Vol 50.

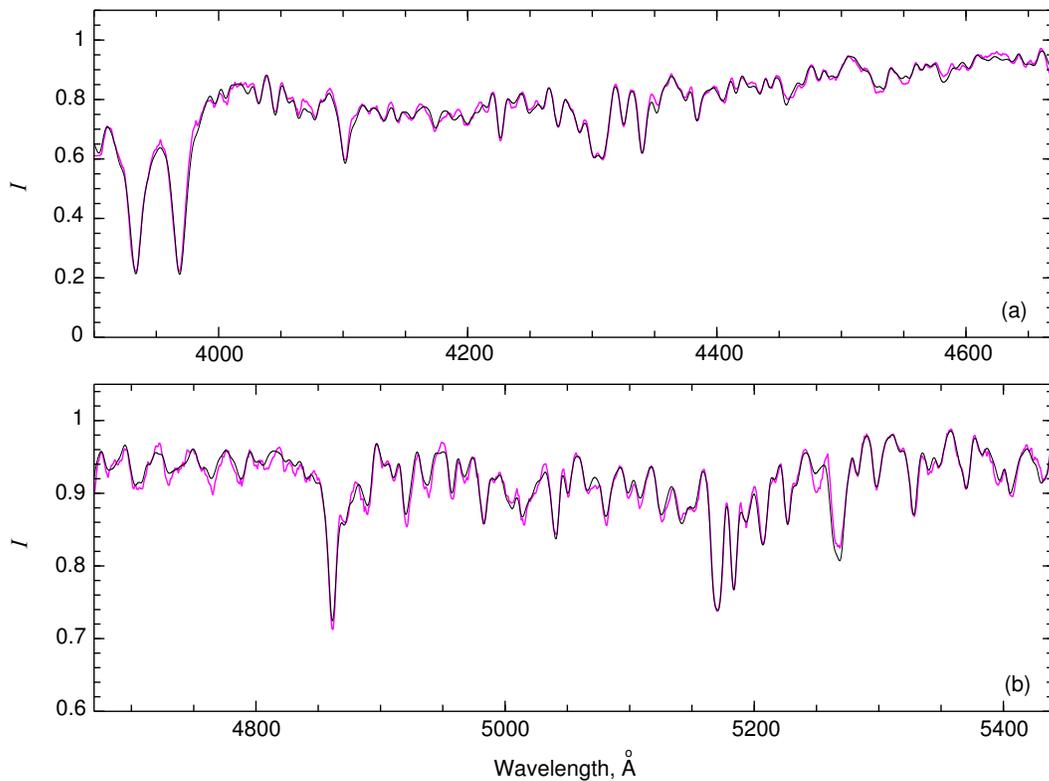


Рис. 11. Сравнение спектра скопления Vol 20 (розовая линия) с модельным (черная линия), построенным с использованием изохроны B08 ($Z=0.002$, $Y=26$, $\lg(\text{Age}) = 10.15$).

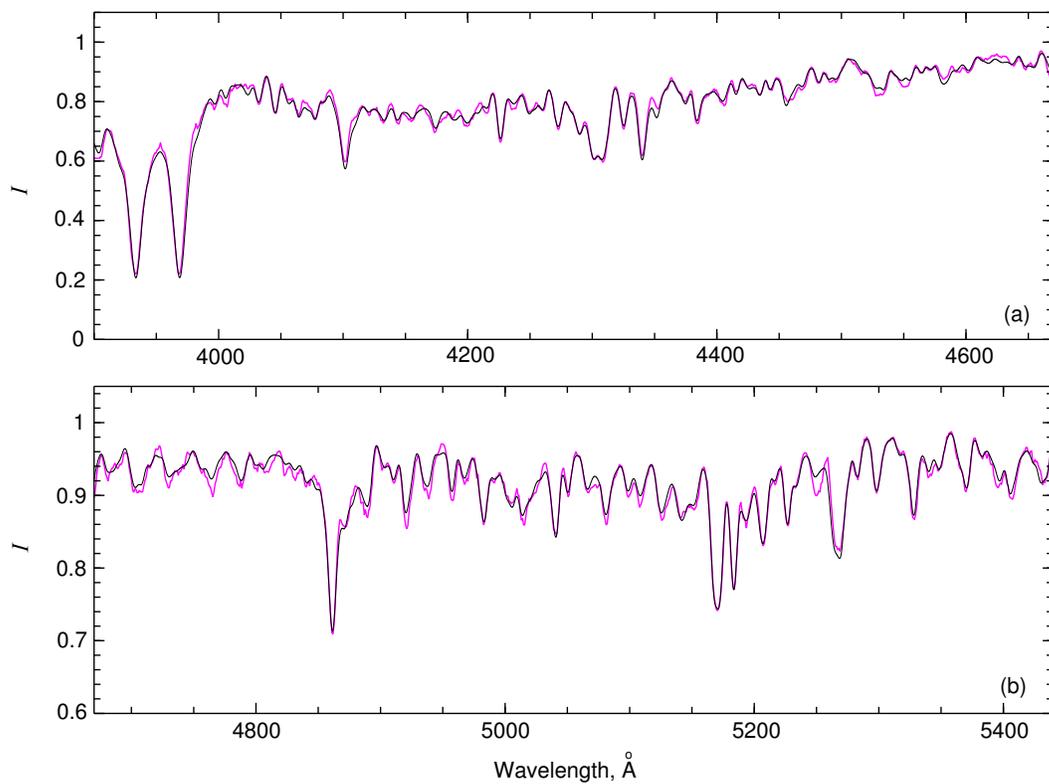


Рис. 12. Сравнение спектра скопления Vol 20 (розовая линия) и модельного (черная линия), построенного с использованием изохроны P04 ($Z=0.002$, $Y=25$, Age=12 млрд. лет.)

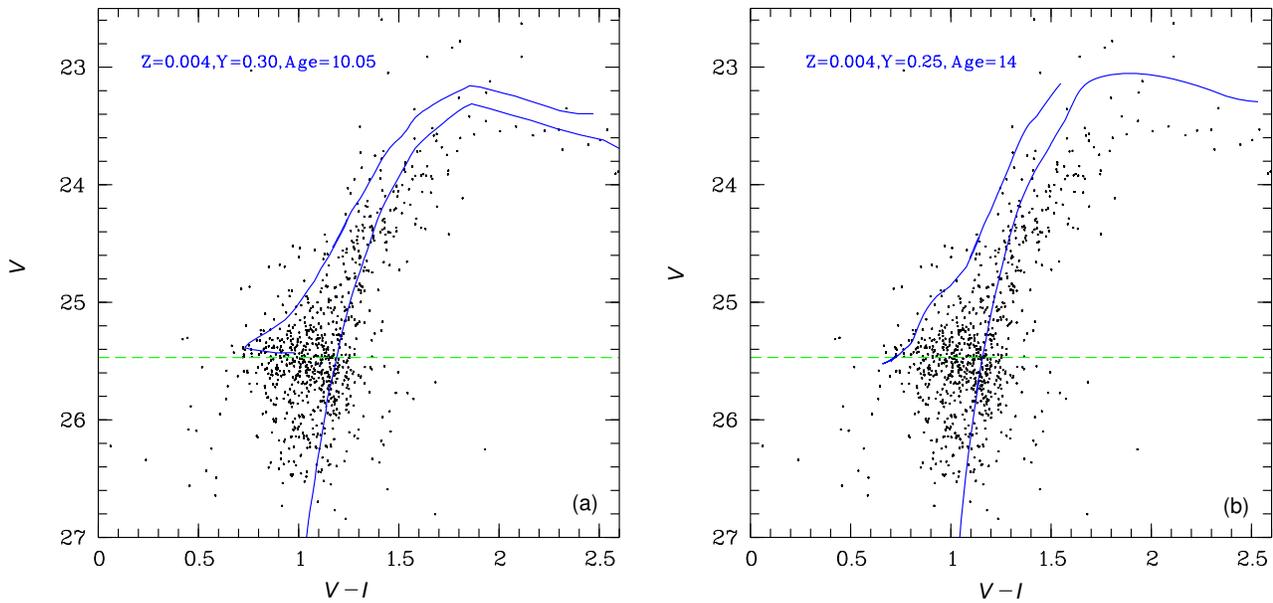


Рис. 13. (a) — сравнение CMD Bol 6 с изохронами B08, $E(B - V) = 0.08$, $(m - M)_0 = 24.57$. (b) — сравнение CMD Bol 6 с изохронами P04, $E(B - V) = 0.08$, $(m - M)_0 = 24.51$. Зеленой штриховой линией на обоих графиках показан уровень V_{NB} (Federici et al. (2012)).

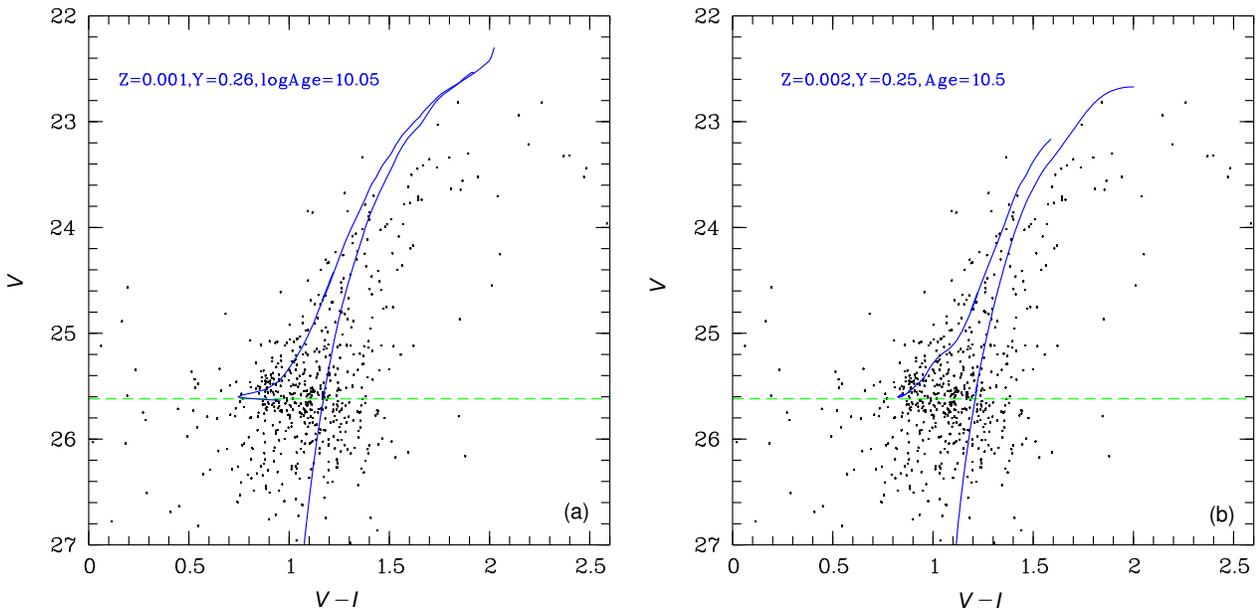


Рис. 14. (a) — сравнение CMD Bol 45 с изохронами B08, $E(B - V) = 0.16$, $(m - M)_0 = 24.51$. (b) — сравнение CMD Bol 45 с изохронами P04, $E(B - V) = 0.16$, $(m - M)_0 = 24.51$. Зеленой пунктирной линией на обоих графиках показан уровень V_{NB} (Federici et al. (2012)).

в М 31 и выполнено сравнение с литературными данными. Как пояснялось в разделе 4, для Bol 50 были приняты такие же оценки содержаний элементов, как и у Bol 45. Содержание элементов α -процесса, приведенное в таблице 5, было вычис-

лено как средние значения содержаний элементов Mg, Ca и O. Там же даны содержания элементов α -процесса из работ Sakagi et al. (2016) и Colucci et al. (2014), полученные методом спектроскопии высокого разрешения. В этих статьях $[\alpha/Fe]$ вы-

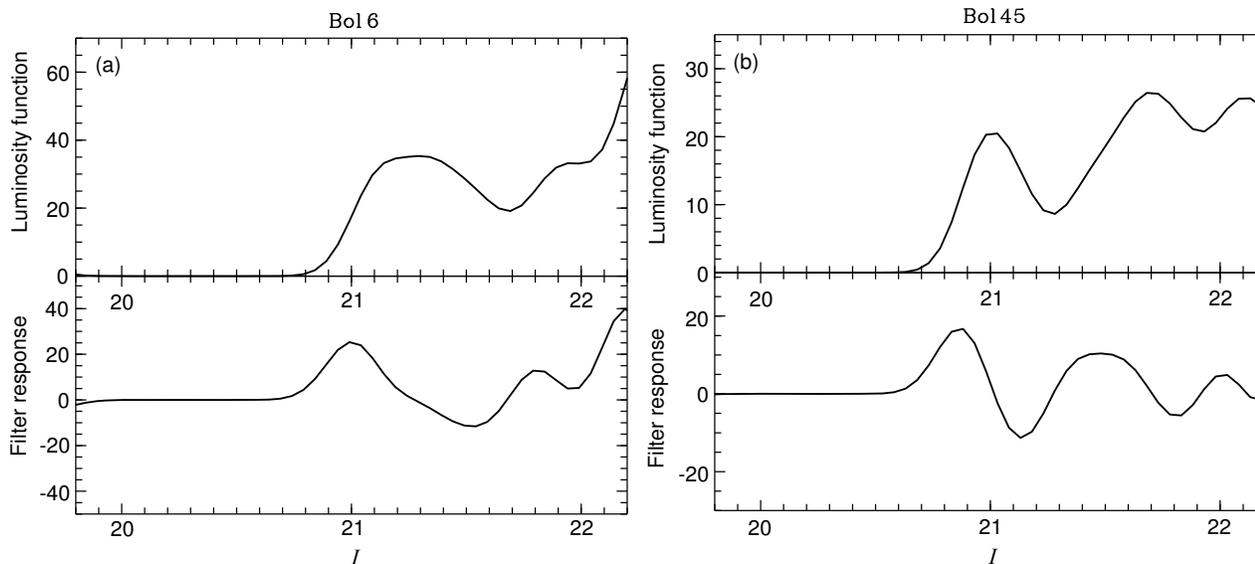


Рис. 15. (a) — функция светимости (вверху) Bol 6 и результат фильтрации функции светимости (внизу), полученное значение $m_{I, \text{TRGB}} = 21.0 \pm 0.26$. (b) — функция светимости (вверху) Bol 45 и результат фильтрации функции светимости (внизу), полученное значение $m_{I, \text{TRGB}} = 20.85 \pm 0.21$.

числено как среднее содержаний элементов Ca, Si и Ti.

Определенные нами содержания элементов, [Fe/H] и возраст (таблица 5) для Bol 6 и Bol 45 близки к литературным значениям, найденным методом спектроскопии высокого разрешения (Sakari et al. 2016, Colucci et al. 2014), за исключением [C/Fe]. Согласно результатам настоящего исследования, у двух скоплений более высокое содержание [C/Fe] по сравнению с данными Sakari et al. (2016) по измерениям в инфракрасном диапазоне. Для Bol 45 мы получили более высокие [Mg/Fe] и [Ca/Fe], чем в литературе. Причину расхождения в [C/Fe] объясняют Sakari et al. (2016). Дело в том, что спектральный диапазон в инфракрасной полосе H, использованный этими авторами, чувствителен в основном только к излучению звезд вершины ветви красных гигантов, для которых характерны пониженные [C/Fe] из-за изменения химического состава в процессе эволюции звезд (см., например, Sharina and Shimansky (2020) и ссылки в этой статье). Оптические же спектры содержат излучение всех звезд скоплений. Причем, излучение звезд точки поворота MS вносит существенный вклад в интегральный спектр ввиду многочисленности этих объектов, согласно функции светимости звезд в скоплении (о вкладе разных эволюционных стадий в интегральный спектр см. Sharina et al. (2013)). Расхождения в [Mg/Fe] и [Ca/Fe] между нашими и литературными значениями, полученными в исследованиях интегральных спектров высокого разрешения, можно объяснить недостаточным

S/N в спектрах и различиями в применяемых методиках. Различия в оценках содержаний по спектрам высокого разрешения в литературе были отмечены и Sharina et al. (2020). На правых панелях рис. 4 в статье Sharina et al. (2020) видно, что различия между данными [Mg/Fe] и [Ca/Fe] Larsen et al. (2017) и Colucci et al. (2017) для некоторых скоплений достигают порядка 0.3–0.4 dex. В спектрах, используемых в данной работе, накоплен значительный сигнал. Линии Mg (Mg I 5183 Å) и Ca (Ca I 4227 Å и линий K и H Ca II 3933.7 Å и 3968.5 Å), по которым оценивались содержания, являются доминирующими в спектрах при разрешении $FWHM \sim 5$ Å. Поэтому вероятность ошибочного определения низка.

Для Bol 20 и Bol 50 в литературе нет результатов спектроскопии высокого разрешения и, соответственно, [X/Fe] для сравнения. Металличность и возраст, полученные Caldwell et al. (2011) методом измерения в спектрах Ликских индексов и сравнения их с модельными, близки к нашим оценкам для Bol 50, но значительно отличаются для Bol 20. Необходимо отметить, что применяемый в данной работе метод был тестирован с использованием спектров хорошо изученных шаровых скоплений Галактики (Sharina et al. 2020). Возраст определен с более высокой точностью, чем по методу Ликских индексов (см., например, Caldwell et al. (2011)).

5.1. Диаграммы «цвет–звездная величина» для Bol 6 и Bol 45 по литературным данным

Для Bol 6 и Bol 45 в литературе имеются данные широкополосной фотометрии (Ajhar et al. 1996),

Таблица 5. Сравнение полученных значений возраста, Y , $[Fe/H]$ и содержаний химических элементов $[X/Fe]$ с литературными данными

| Объект | Bol 6 | | | | Bol 45 | | | | Bol 50 | | Bol 20 | | | |
|---------------------|-------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|--------------|---------------|-------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| | Ref. | Ours | S16 _{IR} | S16 _{оп} | C14 | Cl11 | Ours | S16 _{IR} | C14 | Cl11 | Ours | Cl11 | Ours | Cl11 |
| Age, млрд. лет | | 11.2 ±1 | | | 12.5 ±2.5 | | 11 ±1 | | 12.5 ±2.5 | | 11 ±1 | 13.5 ±2 | 13 ±1 | 7.9 ±2 |
| Y | | 0.3 | | | | | 0.26 | | | | 0.26 | | 0.26 | |
| $[Fe/H]$, dex | | -0.75 ±0.1 | -0.69 ±0.05 | -0.73 ±0.02 | -0.73 ±0.1 | -0.5 ±0.1 | -1.1 ±0.1 | -0.88 ±0.07 | -0.94 ±0.1 | -0.9 ±0.1 | -1.1 ±0.1 | -0.8 ±0.1 | -1.0 ±0.1 | -0.9 ±0.1 |
| $[C/Fe]$, dex | | 0.1 ±0.15 | -0.32 ±0.05 | | | | 0.26 ±0.15 | -0.41 ±0.07 | | | 0.26 ±0.15 | | 0.1 ±0.15 | |
| $[N/Fe]$, dex | | 1.45 ±0.2 | 1.35 ±0.04 | | | | 0.7 ±0.2 | 0.9 ±0.1 | | | 0.7 ±0.2 | | 1.35 ±0.2 | |
| $[O/Fe]$, dex | | 0.3 | 0.32 ±0.04 | | | | 0.3 | 0.33 ±0.12 | | | 0.3 | | 0.3 | |
| $[Mg/Fe]$, dex | | 0.55 ±0.1 | 0.43 ±0.05 | 0.46 ±0.1 | 0.34 ±0.03 | | 0.6 ±0.1 | 0.22 ±0.15 | 0.04 ±0.15 | | 0.6 ±0.1 | | 0.5 ±0.1 | |
| $[Ca/Fe]$, dex | | 0.48 ±0.1 | 0.31 ±0.07 | 0.26 ±0.02 | 0.25 ±0.05 | | 0.45 ±0.2 | 0.2 ±0.13 | 0.22 ±0.04 | | 0.45 ±0.2 | | 0.45 ±0.1 | |
| $[Mn/Fe]$, dex | | -0.5 ±0.2 | | | | | -0.4 ±0.2 | | | | -0.4 ±0.2 | | -0.55 ±0.2 | |
| $[Ti/Fe]$, dex | | 0.15 ±0.2 | 0.43 ±0.07 | 0.17 ±0.05 | 0.2 ±0.05 | | 0.2 ±0.2 | 0.27 ±0.14 | 0.16 ±0.06 | | 0.2 ±0.2 | | 0.2 ±0.2 | |
| $[Cr/Fe]$, dex | | 0.0 ±0.2 | | | | | -0.05 ±0.2 | | | | -0.05 ±0.2 | | 0.05 ±0.2 | |
| $[\alpha/Fe]$, dex | | 0.44 ±0.25 | 0.37 | 0.3 | 0.3 | | 0.45 ±0.25 | 0.3 | 0.29 | | 0.45 ±0.25 | | 0.41 ±0.25 | |

Ours — значения, полученные в данной работе;

S16_{IR} — Sakari et al. (2016) по спектрам высокого разрешения в ИК-диапазоне;

S16_{оп} — Sakari et al. (2016) по спектрам высокого разрешения в оптическом диапазоне;

C14 — Colucci et al. (2014) по спектрам высокого разрешения в оптическом диапазоне;

Cl11 — Caldwell et al. (2011) по спектрам умеренного разрешения в оптическом диапазоне;

полученные на HST с помощью камеры WFPC2 в фильтрах $F555W$ и $F814W$, которые могут быть использованы для независимой проверки результатов исследования интегральных спектров, выполненного в данной работе.

На рис. 13 и 14 показано сравнение выбранных изохрон (таблицы 3 и 4) с наблюдаемыми CMD, ос-

нованное на литературных значениях уровня светимости горизонтальной ветви V_{HB} (Federici et al. 2012), а также на металличности и возрасте, определенных нами в результате анализа спектров (разделы 3 и 4). Глубина диаграмм «цвет–звездная величина», построенных по данным фотометрии,

ниже горизонтальной ветви примерно на 1 зв. вел., что позволяет с осторожностью утверждать, что у скоплений «красные» НВ (рис. 13 и 14). Звезды фона вносят вклад в CMD исследуемых скоплений (Federici et al. 2012). В таблице 6 даны полученные в результате нашей работы с данными звездной фотометрии металличность, избытки цвета $E(B - V)$, а также модули расстояния до Vol 6 и Vol 45 в сравнении с соответствующими значениями, взятыми из литературы. В последней колонке в скобках указан метод определения расстояния: светимость звезд НВ или светимость вершины ветви красных гигантов (TRGB). Также приведен уровень горизонтальной ветви скоплений по данным из литературы. Из таблицы следует, что определенные в данной статье $E(B - V)$ и $(m - M)_0$ близки к литературным значениям. Металличность используемых изохрон ниже литературных значений, полученных фотометрическим способом, примерно на 0.06–0.16 dex.

5.1.1. Определение расстояния до скоплений по светимости вершины ветви красных гигантов

Светимость звезд TRGB является одним из наиболее точных индикаторов расстояния до галактик, в которых присутствует старое, бедное металлами звездное население (Lee et al. 1993).

Da Costa and Armadroff (1990) калибровали метод с помощью точной фотометрии шаровых скоплений Галактики, расстояния до которых были хорошо известны к тому времени. Авторы показали, что светимость TRGB в фильтре I фотометрической системы Джонсона–Казинса слабо меняется для звезд с металличностями в диапазоне $-2.2 < [Fe/H] < -0.7$ dex и составляет $M_{I,TRGB} = -4.05$. Отсюда модуль расстояния может быть определен следующим образом: $(m - M)_0 = m_{I,TRGB} - A_I + 4.05$, где $m_{I,TRGB}$ — наблюдаемая звездная величина TRGB, а A_I — поправка за поглощение в фильтре I .

В настоящей работе используется метод определения $m_{I,TRGB}$ Sakai et al. (1996), согласно которому функция светимости красных гигантов вычислялась как сумма гауссиан, соответствующих звездным величинам красных гигантов и нормированных на фотометрические ошибки измерения звездных величин.

Перед построением функции светимости удалялись фоновые звезды и звезды AGB. Полученные функции светимости и соответствующие математические фильтры, определяющие TRGB, рассчитанные по формулам (A1) и (A2) из Sakai et al. (1996) для Vol 6 и Vol 45, приведены на рис. 15. Используя данный метод, мы получили следующие значения: $m_{I,TRGB} = 21.0 \pm 0.26$ для Vol 6 и

$m_{I,TRGB} = 20.85 \pm 0.21$ для Vol 45. Отсюда следует, что модули расстояния $(m - M)_0 = 24.72 \pm 0.26$ при $A_I = 0.17$ для Vol 6 и 24.59 ± 0.21 для Vol 45. Графики сравнения выбранных изохрон с наблюдаемыми CMD с учетом полученных модулей расстояния приведены на сайте^{10, 11}. Исходя из результатов определения расстояний по светимости TRGB, оценена удаленность скоплений от центра M 31: $R_{M31} = 135$ и 85 кпс для Vol 6 и Vol 45 соответственно.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые определены содержания элементов C, N, O, Mg, Ca, Mn, Ti и Sr для шаровых скоплений Vol 50 и Vol 20 в ближайшей к нам спиральной галактике M 31. Используемый в работе метод разработан Sharina et al. (2020). Химический состав для двух других исследованных нами скоплений в M 31 — Vol 6 и Vol 45 — в целом согласуется в пределах ошибок содержаний с литературными значениями, полученными методом спектроскопии высокого разрешения. Для всех четырех объектов определены также возраст, металличность $[Fe/H]$ и впервые — удельное содержание гелия Y. Значения полученных возраста и металличности согласуются с литературными данными. Результаты исследования и сравнение их с имеющимися в литературе значениями приведены в таблице 5. Общей особенностью четырех скоплений выборки является средняя металличность $[Fe/H]$ $[-1.1; -0.75]$ dex и большой возраст 11–14 млрд. лет (см. таблицу 5).

Полученные содержания соответствуют таковым в моделях химической эволюции Галактики под воздействием сверхновых типа II (SNe II) и гиперновых (Kobayashi et al. (2006), см. рис. 32) в диапазоне по металличности $[Fe/H] = [-1.1; -0.75]$ dex.

Объекты исследования имеют близкие небесные координаты. Они расположены между M 31 и ее спутником — карликовой эллиптической галактикой NGC 205, однако их лучевые скорости различны. У скоплений в этой области заметны большие различия по лучевым скоростям и металличности (Caldwell et al. 2016). Данные авторы выделили три популяции шаровых скоплений в M 31: высокометаллические, средней металличности ($-1.5 < [Fe/H] < 0.4$) с медианным значением $[Fe/H] = -1$ dex и низкометаллические. Эти группы имеют

¹⁰ ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/GC4M31/bo16/cmd_Bo16_newdist.ps для Vol 6.

¹¹ ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/GC4M31/bo145/cmd_Bo145_newdist.ps для Vol 45.

Таблица 6. Результаты сравнения выбранных изохрон (см. таблицы 3 и 4) с наблюдаемыми CMD и литературными значениями

| Объект | [Fe/H], dex | $E(B - V)$, зв. вел. | $V_{\text{НВ}}$, зв. вел. | $(m - M)_0$ | Ссылка (метод) |
|--------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------|
| Bol 6 | -0.71 ± 0.15 | 0.08 ± 0.02 | | 24.57 ± 0.08 | ours (HB) |
| | -0.75 ± 0.10 | 0.17 ± 0.08 | | 24.72 ± 0.26 | ours (TRGB) |
| | -0.57 ± 0.15 | 0.089 ± 0.02 | 25.47 | 24.43 | Ajhar et al. (1996) (HB) |
| | -0.57 | 0.1 | 25.46 | 24.57 | Rich et al. (2005) (HB) |
| | -0.55 | 0.08 | 25.46 | 24.56 | Federici et al. (2012) (HB) |
| Bol 45 | -1.0 ± 0.3 | 0.16 ± 0.02 | | 24.51 ± 0.08 | ours (HB) |
| | -1.1 ± 0.1 | 0.16 ± 0.02 | | 24.59 ± 0.21 | ours (TRGB) |
| | -0.94 ± 0.27 | $0.12 \pm 0.03^{\text{BH82}}$ | 25.55 | 24.43 | Ajhar et al. (1996) (HB) |
| | -0.85 | 0.1 | 25.62 | 24.55 | Rich et al. (2005) (HB) |
| | -0.9 | 0.16 | 25.62 | 24.55 | Federici et al. (2012) (HB) |

BH82 — значение избытка цвета $E(B - V)$ для Bol 45 из Burstein and Heiles (1982)

разное пространственное распределение. Скопления средней металличности, к которым относятся и наши объекты, распределены в широкой области до галактоцентрических расстояний $R_{\text{M31}} \sim \sim 30$ кпс и показывают в среднем слабое вращение в направлении вращения диска М 31. Для этих объектов характерна высокая степень концентрации к центру М 31 и существенный разброс по лучевым скоростям относительно скорости М 31. Высокометаллическая группа ($R_{\text{M31}} < 8$ кпс) имеет кинематику диска. Низкометаллические скопления распределены почти однородно в проекции на небо и слабо концентрируются к центру М 31.

Четыре исследованных в данной работе скопления расположены на расстоянии от центра М 31 в проекции на небо $4.4 < R_{\text{M31}} < 7.3$ кпс. Их металличность ниже, чем средняя металличность красных гигантов гало М 31 на данном расстоянии от центра М 31 (см. Gilbert et al. (2020) и ссылки в этой статье). Среднее содержание альфа-элементов у звезд внутреннего гало М 31 ($[\alpha/\text{Fe}] = 0.45 \pm 0.09$ dex) выше, чем у звезд внешнего гало ($[\alpha/\text{Fe}] = 0.3 \pm 0.16$ dex). Полученные значения $[\alpha/\text{Fe}]$ у четырех объектов соответствуют среднему значению $[\alpha/\text{Fe}]$ звезд внутреннего гало на данном расстоянии от центра М 31.

Близость карликовой галактики NGC 205 к М 31 ($D_{\text{M31}} \sim 42$ кпс, (McConnachie (2012), таблица 2) и небольшая разница в скоростях между двумя галактиками (GeHa et al. 2006) свидетельствуют о вероятном взаимодействии в недалеком прошлом

с массивным соседом (Davidge 2005; 2003, Thilker 2004). Средняя металличность звезд ветви красных гигантов NGC 205 $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.9$ (Mould 1984) имеет большую дисперсию значений: ± 0.5 dex. Sharina et al. (2006) определили возраст, металличность и $[\alpha/\text{Fe}]$ для пяти скоплений в NGC 205 по данным ликских индексов. Металличность скоплений находится в интервале от $[Z/\text{H}] \sim -0.6$ до -1.3 dex, в который попадают и четыре скопления данной выборки (см. таблицу 5). Однако диапазон по возрастам у скоплений в NGC 205 большой: от 4 до 11 млрд. лет. Только Bol 6 показывает лучевую скорость, близкую к системной скорости NGC 205.

Дальнейшие исследования возраста и химического состава шаровых скоплений и звезд в М 31 и в карликовых спутниках позволят прояснить вопрос о происхождении каждого из скоплений и их принадлежности к той или иной подсистеме.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен М. Е. Шариной за руководство работой и за предоставление наблюдательных данных, полученных на 6-м телескопе БТА САО РАН, и В. В. Шиманскому за предоставление доработанной версии программы CLUSTER для моделирования спектров.

Цифровой обзор неба был подготовлен Институтом исследований космоса с помощью космического телескопа в рамках гранта правительства США NAG W-2166.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
2. E. A. Ajhar, C. J. Grillmair, T. R. Lauer, et al., *Astron. J.* **111**, 1110 (1996).
3. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 481 (2009).
4. K. Banse, P. Crane, P. Grosbol, et al., *Messenger* **31**, 26 (1983).
5. P. Barmby, D. E. McLaughlin, W. E. Harris, et al., *Astron. J.* **133**, 2764 (2007).
6. G. Bertelli, L. Girardi, P. Marigo, and E. Nasi, *Astron. and Astrophys.* **484**, 815 (2008).
7. D. Burstein and C. Heiles, *Astron. J.* **87**, 1165 (1982).
8. N. Caldwell and A. J. Romanowsky, *Astrophys. J.* **824**, 42 (2016).
9. N. Caldwell, P. Harding, H. Morrison, et al., *Astron. J.* **137**, 94 (2009).
10. N. Caldwell, R. Schiavon, H. Morrison, et al., *Astron. J.* **141**, 61 (2011).
11. F. Castelli and R. L. Kurucz, *IAU Symp.* **210**, A20 (2003).
12. E. Cezario, P. R. T. Coelho, A. Alves-Brito, et al., *Astron. and Astrophys.* **549**, A60 (2013).
13. G. Chabrier, *Astrophys. Space Sci. Library* **327**, 41 (2005).
14. J. E. Colucci, R. A. Bernstein, and J. G. Cohen, *Astrophys. J.* **797**, 116 (2014).
15. J. E. Colucci, R. A. Bernstein, and A. McWilliam, *Astrophys. J.* **834**(2), id. 105 (2017).
16. G. S. Da Costa and T. E. Armadroff, *Astron. J.* **100**, 162 (1990).
17. T. J. Davidge, *Astrophys. J.* **597**, 289 (2003).
18. T. J. Davidge, *Astron. J.* **130**, 2087 (2005).
19. D. Fabricant, R. Fata, J. Roll, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **117**, 1411 (2005).
20. Z. Fan, R. de Grijs, B. Chen, et al., *Astron. J.* **152**, 208 (2016).
21. L. Federici, C. Cacciari, M. Bellazzini, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, id. A155 (2012).
22. S. Galleti, L. Federici, M. Bellazzini, et al. *Astron. and Astrophys.* **416**, 917 (2004).
23. M. Geha, P. Guhathakurta, R. M. Rich, and M. C. Cooper, *Astron. J.* **131**, 332 (2006).
24. K. M. Gilbert, J. Wojno, E. N. Kirby, et al., *Astron. J.* **160**, 41 (2020).
25. E. Hubble, *Astrophys. J.* **76**, 44 (1932).
26. C. Kobayashi, H. Umeda, K. Nomoto, et al., *Astrophys. J.* **653**, 1145 (2006).
27. M. Koleva, P. Prugniel, P. Ocvirk, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **385**, 1998 (2008).
28. M. Koleva, P. Prugniel, A. Bouchard, and Y. Wu, *Astron. and Astrophys.* **501**, 1269 (2009).
29. S. S. Larsen, J. P. Brodie, and J. Strader, *Astron. and Astrophys.* **601**, id. A96 (2017).
30. M. G. Lee, W. L. Freedman, and B. F. Madore, *Astrophys. J.* **417**, 553 (1993).
31. D. Mackey, G. F. Lewis, B. J. Brewer, et al., *Nature* **574**, 69 (2019).
32. A. W. McConnachie, R. Ibata, N. Martin, et al., *Astrophys. J.* **868**, 55 (2018).
33. A. W. McConnachie, M. J. Irwin, A. M. Ferguson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356**, 979 (2005).
34. A. W. McConnachie, *Astron. J.* **144**, 4 (2012).
35. J. R. Mould, J. Kristian, and G. S. Da Costa, *Astrophys. J.* **278**, 575 (1984).
36. A. Pietrinferni, S. Cassisi, M. Salaris, and F. Castelli, *Astrophys. J.* **612**, 168 (2004).
37. R. M. Rich, C. E. Corsi, C. Cacciari, et al., *Astron. J.* **129**, 2670 (2005).
38. A. J. Riess, L. M. Macri, S. L. Hoffmann, et al., *Astrophys. J.* **826**, 56 (2016).
39. S. Sakai, B. F. Madore, and W. L. Freedman, *Astrophys. J.* **461**, 713 (1996).
40. C. M. Sakari, M. D. Shetrone, R. P. Schiavon et al., *Astrophys. J.* **829**(2), 116 (2016).
41. C. M. Sakari, K. Venn, M. Shetrone, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **443**, 2285 (2014).
42. R. P. Schiavon, J. A. Rose, S. Courteau, and L. A. MacArthur, *Astrophys. J. Suppl.* **160**(1), 163 (2005).
43. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
44. C. K. Seyfert and J. J. Nassau, *Astrophys. J.* **102**, 377 (1945).
45. M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and N. N. Shimanskaya, *Astrophysical Bulletin* **75**, 247 (2020).
46. M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and D. A. Khamidullina, *Astrophysical Bulletin* **73**, 318 (2018).
47. M. E. Sharina, V.V. Shimansky, and E. Davoust, *Astronomy Reports* **57**, 410 (2013).
48. M. E. Sharina and V.V. Shimansky, in *Proc. All-Russian Conference on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2020), p. 267.
49. M. E. Sharina, V. L. Afanasiev, and T. H. Puzia, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 1259 (2006).
50. D. A. Thilker, R. Braun, R. A. M. Walterbos, et al., *Astrophys. J.* **601**, L39 (2004).
51. D. Tody, *ASP Conf. Ser* **52**, 173 (1993).
52. S. Wang, J. Ma, and J. Liu, *Astron. and Astrophys.* **623**, id. A65 (2019).
53. S. Wang, B. Chen, and J. Ma, *Astron. and Astrophys.* **645**, A115 (2021).

Study of Integrated Spectra of Four Globular Clusters in M 31**M. I. Maricheva¹**¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, 369167 Russia

The results of determining the metallicity, age, helium mass fraction (Y) and abundances of the elements C, N, Mg, Ca, Mn, Ti and Cr by moderate resolution spectra for four globular clusters in the galaxy M 31: Bol 6, Bol 20, Bol 45 and Bol 50 are presented. The chemical composition for Bol 20 and Bol 50, and Y for four clusters are determined for the first time. The spectra of the studied objects were obtained with the 6-meter telescope of the SAO RAS in 2020. All the clusters under study turned out to be older than 11 Gyrs. The determined metallicities $[Fe/H]$ are in the range from -1.1 to -0.75 dex. They are lower than the metallicity of stars of the M 31 halo at a given distance from the galactic center ($R_{M\ 31} < 10$ kpc). The abundances of the elements of the α -process $[\alpha/Fe] = ([O/Fe] + [Mg/Fe] + [Ca/Fe])/3$ of the four clusters correspond to those of the stars of the inner halo of M 31.

Keywords: *globular clusters: general—globular clusters: individual: Bol 6, Bol 20, Bol 45, Bol 50—galaxies: individual: M 31*