

УДК 524.47-338/36

ВОЗРАСТ, СОДЕРЖАНИЕ ГЕЛИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ НЕСКОЛЬКИХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ М31 И В НАШЕЙ ГАЛАКТИКЕ

© 2018 М. Е. Шарина^{1*}, В. В. Шиманский², Д. А. Хамидуллина³

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

³Инженерный лицей КНИТУ-КАИ, Казань, 420057 Россия

Поступила в редакцию 16 января 2018 года; принята в печать 29 марта 2018 года

Представлены результаты определения возраста, содержания гелия (Y), металличности ($[Fe/H]$), и оценки содержаний элементов C, N, O, Mg, Ca, Ti, Cr, Ni, Sr и Ba четырех шаровых скоплений в окрестности галактики Андромеда ([SD2009]GC7, Mayall II, Mackey-GC1 (MGC1) и Bol 298 (MGC6)) и для шести галактических шаровых скоплений. Для определения параметров использованы длиннощелевые интегральные спектры среднего разрешения интегрального излучения исследуемых скоплений. Наблюдения внегалактических объектов были проведены на 6-м телескопе БТА с помощью многомодового редуктора светосилы SCORPIO-1. Галактические шаровые скопления NGC 6341 (M92), NGC 6838 (M71), NGC 7078 наблюдались со спектрографом CARELEC 1.93-м телескопа обсерватории Верхнего Прованса. Спектры интегрального излучения шаровых скоплений Галактики NGC 104, NGC 6121 (M4), NGC 7078 (M15) взяты из спектральной библиотеки Скиавон. Выбор оптимальной изохроны для каждого скопления производился путем согласования формы и интенсивности наблюдаемых и теоретических профилей линий Бальмеровской серии водорода.

Ключевые слова: шаровые скопления: общие — шаровые скопления: индивидуальные: Mayall II, MGC 1, Bol 298, [SD2009] GC7, NGC104, NGC6121, NGC6838, NGC7078 — галактики: индивидуальные: M31

1. ВВЕДЕНИЕ

Шаровые скопления, согласно современным фотометрическим и спектральным данным, не являются простыми системами, состоящими из звезд одного возраста и химического состава ([1, 2]). В этом состоит их отличие от рассеянных скоплений [3]. Наряду со звездами, имеющими химический состав, сходный с таковым для объектов Галактического гало, шаровые скопления содержат звезды, сформировавшиеся из вещества, прошедшего полный CNO-цикл и реакции протонного захвата легких ядер. Несмотря на то, что большинство шаровых скоплений химически однородны в терминах содержания железа и элементов s-процесса ([4]), многочисленные спектроскопические исследования выявили в них значительные вариации в содержании легких элементов, проявляющиеся часто как антикорреляции: C–N, O–Na, Mg–Al ([1, 3], и ссылки в этих статьях). Эффект множественности звездных населений

был детектирован с использованием диаграмм «цвет–звездная величина» (далее: CMD) также у скоплений разного возраста в Магеллановых Облаках (например, [5–7]).

Детальное исследование возраста и содержания различных химических элементов с помощью спектроскопии высокого разрешения и изучения глубоких диаграмм CMD возможно на сегодняшний день только для ярчайших и самых близких внегалактических шаровых скоплений (например, [8] и ссылки в этой статье). Разработанный нами метод популяционного синтеза суммарного излучения звездных скоплений в соответствии с заданной функцией масс звезд Chabrier [9] и использованием моделей звездных атмосфер позволяет выполнить эту задачу для внегалактических скоплений [10–14]. Основное отличие от других работ по популяционному синтезу спектров интегрального излучения шаровых скоплений, появившихся в последние годы в литературе (например, [8, 15, 16]), состоит в том, что мы анализируем форму и интенсивность профилей линий водорода, что позволяет судить о

*E-mail: sme@sao.ru

возрасте, содержании гелия и типе горизонтальной ветви шарового скопления. Мы используем интегральные спектры скоплений умеренного разрешения (ширина на половине интенсивности профиля абсорбционной линии $\text{FWHM} \leq 5 \text{ \AA}$). Для успешного выполнения задачи необходимо, чтобы отношение сигнал—шум в спектре было порядка или более сотни. Изохроны звездной эволюции группы Padova [17], включающие наряду с другими стадиями эволюции звезд стадии горизонтальной (HB) и асимптотической (AGB) ветвей, дают необходимый и достаточный набор параметров (T_{eff} , $\lg g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$) для синтезирования спектров звезд, входящих в скопления. Важно, что используемые изохроны [17] имеют содержание гелия (Y) в качестве одного из параметров, влияющих на эволюцию звезд, так как металличность, возраст и содержание гелия в звездах — это первый, второй и третий параметры, влияющие на распределение звезд на HB шаровых скоплений [18]. Синтезирование спектров интегрального излучения скоплений выполняется в нашей программе на основе численного моделирования переноса излучения в звездных атмосферах (программный комплекс SPECTR [19]).

При разрешении $\text{FWHM} \sim 5 \text{ \AA}$ почти все спектральные линии оказываются блендированными. Чтобы определить содержания элементов, мы выбираем в спектре доминантные линии, обладающие наибольшей чувствительностью к содержанию того или иного элемента. Железо доминирует в значительной части оптического диапазона, что позволяет измерять его содержание с хорошей точностью. Стоит однако отметить, что интенсивность разных линий железа зависит в разной степени и от скорости микротурбуленции ([14, 20] и ссылки в этих статьях). Для задания наиболее оптимального, постоянного для интегрального спектра, значения этого параметра, мы использовали бленды линий на длинах волн: 5456, 5446, 5405, 5327, 5283, 5269, 5227, и 5216 \AA , — интенсивности которых зависят главным образом только от содержания железа и скорости микротурбуленции.

Наряду с оценкой содержаний ряда химических элементов, мы определяем возраст и содержание гелия (Y) по спектрам с широким диапазоном длин волн (как правило, 3900—5500 \AA). Содержание гелия в звездах шаровых скоплений трудно установить непосредственно из анализа их наблюдаемых спектров (см., например, [21, 22]). Эту задачу мы выполняем, используя факт разной зависимости глубины и формы водородных линий поглощения ($\text{H}\delta$, $\text{H}\gamma$, $\text{H}\beta$ и др.) от возраста и содержания гелия, задаваемых при моделировании спектра скопления на основе его теоретической изохроны [10]. Увеличение содержания гелия практически не влияет на

форму изохроны на участках главной последовательности, ветвей субгигантов и красных гигантов (здесь и далее: SGBs, RGBs). Однако светимость горячих звезд HB при этом существенно возрастает. В спектрах таких звезд водородные линии в основном усилены в области доплеровского ядра. Поэтому увеличение содержания гелия приводит к возрастанию глубины водородных линий. Максимальное усиление интенсивности испытывают линии водорода в голубом диапазоне спектра.

В данной статье мы оцениваем содержания элементов и эволюционные параметры для четырех внегалактических шаровых скоплений, находящихся в широких окрестностях ближайшей к нам гигантской спиральной галактики M31 ([SD2009] GC7, Mayall II, Mackey-GC1 (MGC1) [23] и Vol 298 (MGC6)), а также для пяти шаровых скоплений нашей Галактики, имеющих разные возраст, металличность и строение горизонтальных ветвей. Для скопления в галактике-спутнике M31 — NGC 147, открытого Шариной и Давустом в 2009 г. [24], мы используем употребляемое в астрономических базах данных и поисковых системах название «[SD2009] GC7» (далее для краткости [SD09] GC7). В таблице 1 представлены экваториальные координаты, основные фотометрические и структурные характеристики (абсолютная величина, M_V ; центральная поверхностная яркость, μ_V ; колор-эксцесс, $E(B - V)$; индекс горизонтальной ветви (Horizontal Branch Ratio), определяемый исходя из числа звезд в голубой, красной частях горизонтальной ветви и пробе-ле Герцшпрунга, $\text{HBR} = (B - R)/(B + V + R)$; радиус ядра скопления, r_{core} ; радиус на половине светимости, r_h ; индекс концентрации, ($c = r_{\text{core}}/r_{\text{tidal}}$); расстояние от Солнца, Dist_{\odot} и расстояние от центра хозяйской галактики, R_{GC}). На примере галактических объектов с глубокими CMD мы демонстрируем, насколько уверенно искомые параметры (возраст, Y , $[\text{Fe}/\text{H}]$ и содержания некоторых химических элементов) определяются с помощью нашего метода. Способы обработки и анализа спектральных данных описаны в разделе 2. Результаты и их погрешности представлены в разделе 3. Обсуждение полученных данных и выводы содержатся в разделе 4.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Исследованные в данной работе внегалактические шаровые скопления наблюдались в 2011—2012 годах на 6-м телескопе (БТА) с многорежимным фокальным редуктором первичного фокуса SCORPIO-1 [34] в режиме спектроскопической моды с длинной щелью шириной $1''$. Журнал наблюдений представлен в таблице 2.

Таблица 1. Основные структурные и фотометрические характеристики для исследованных в данной работе шаровых скоплений в окрестности M31 ([SD2009]GC7, Mayall II, MGC 1 и Bol 298) и Галактических шаровых скоплений (NGC 104, 6838, 6121, 6341, 7078) [25] (ссылки на оригинальные статьи внизу таблицы)

| Параметр/Объект | [SD09]GC7 | Mayall II | MGC 1 | Bol 298 | N 104 | N 6838 | N 6121 | N 6341 | N 7078 |
|--|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| RA(J2000.0) | 00 32 22 ¹ | 00 32 46 ⁴ | 00 26 47 ⁷ | 00 38 00 ¹⁰ | 00 24 05 | 19 53 46 | 16 23 35 | 17 17 07 | 21 29 58 |
| DEC(J2000.0) | 48 31 27 ¹ | 39 34 40 ⁴ | 39 44 45 ⁷ | 40 43 56 ¹⁰ | -72 04 51 | 18 46 42 | -26 31 31 | 43 08 11 | 12 10 01 |
| M_V , mag | -7.79 ² | -10.94 ⁵ | -8.7 | -8.4 ⁷ | -9.42 | -5.60 | -7.20 | -8.21 | -9.17 |
| μ_V , mag arcsec ⁻² | — | 13.51 ⁶ | — | — | 14.43 | 19.22 | 17.88 | 15.47 | 14.21 |
| $E(B - V)^{\text{lit}}$, mag | 0.17 ² | 0.04 ⁹ | 0.09 ⁷ | 0.09 ⁷ | 0.04 | 0.25 | 0.36 | 0.02 | 0.10 |
| $E(B - V)^{00}$, mag | — | — | — | — | 0.08 | 0.25 | 0.45 | 0.02 | 0.10 |
| HBR | — | -0.14 ⁸ | 0.56 ⁸ | $\leq 0.52^8$ | -0.99 | -1.00 | -0.06 | 0.91 | 0.67 |
| r_{core} , pc | — | 0.78 ⁶ | — | — | 0.52 | 0.73 | 0.53 | 0.56 | 0.21 |
| r_h , pc | — | 6.5 ⁶ | 3.8 ⁷ | 3.9 ⁷ | 3.56 | 1.92 | 2.34 | 2.60 | 3.18 |
| $c = r_{\text{core}}/r_{\text{tidal}}$ | — | 2.01 ⁶ | — | — | 2.03 | 1.15 | 1.59 | 1.81 | 2.50 |
| $Dist_{\odot}^{\text{lit}}$, кпк | 717.2 ³ | 814.6 ⁹ | 762.1 ⁷ | 790.7 ⁷ | 4.5 | 4.0 | 2.2 | 8.3 | 10.3 |
| $Dist_{\odot}^{00}$, кпк | — | — | — | — | 4.7 | 4.0 | 1.9 | 8.1 | 10.3 |
| R_{GC} , кпк | 1.8 ¹ _{N147} | 61.9 ⁸ | 46.4 ⁷ | 28.8 ⁸ | 7.4 | 6.7 | 5.9 | 9.6 | 10.4 |

⁰⁰: this work; ¹: Sharina and Davoust [24]; ²: Veljanoski et al. [26]; ³: Conn et al. [27]; ⁴: Mayall and Eggen [28];

⁵: Meylan et al. [29]; ⁶: Ma et al. [30]; ⁷: Mackey et al. [23]; ⁸: Perina et al. [31]; ⁹: Rich et al. [32];

¹⁰: Barmby et al. [33].

Таблица 2. Журнал спектральных наблюдений на 6-м телескопе с многорежимным фокальным редуктором первичного фокуса SCORPIO-1

| Объект | Дата | T_{exp} , с | Seeing, '' |
|-----------|------------|----------------------|------------|
| [SD09]GC7 | 11.09.2011 | 4×900 | 2 |
| Mayall II | 31.08.2011 | 900 | 2.4 |
| MGC 1 | 07.26.2012 | 2×300 | 1.2 |
| Bol 298 | 02.09.2011 | 2×1200 | 2.1 |

Таблица 3. Журнал спектральных наблюдений со спектрографом CARELEC (ОНР)

| Объект | Дата | T_{exp} , с |
|----------|----------|----------------------|
| NGC 6341 | 8.07.10 | 600 |
| | 10.07.10 | 600 shifted |
| NGC 6838 | 10.07.10 | 600 |
| | | 600 shifted |
| NGC 7078 | 11.07.10 | 2×300 |

В процессе наблюдений использовалась решетка VPHG1200B 1200 штр мм⁻¹, которая обеспечивала дисперсию 0.87 Å pix⁻¹ и спектральное разрешение FWHM ~ 5 Å в рабочем спектральном диапазоне длин волн 3900–5500 Å. Наблюдения проводились с единственным положением щели для каждого из внегалактических объектов, поскольку при данном качестве изображений наиболее яркие, центральные части скоплений примерно соответствовали размеру звездных изображений (таблица 2).

Журнал наблюдений на 1.93-м телескопе обсерватории Верхнего Прованса (ОНР) со спектрографом CARELEC¹ представлен в таблице 3. Спектры объектов NGC 104, NGC 6121 и NGC 7078 были взяты из библиотеки Скиавон [35]. Мы использовали два варианта спектра NGC 7078: из работы [35] и полученный на ОНР. Как будет показано ниже, анализ этих спектров дал одинаковые результаты в пределах ошибок определения параметров. Во время наблюдений на ОНР использовалась решетка 300 штр мм⁻¹,

¹<http://www.obs-hp.fr/guide/carelec/carelec-eng.shtml>

которая обеспечивала дисперсию $1.78 \text{ \AA pix}^{-1}$ и спектральное разрешение с полушириной инструментального профиля $\text{FWHM} \sim 5 \text{ \AA}$ в рабочем спектральном диапазоне $3700\text{--}6800 \text{ \AA}$. Длиннощелевые спектры ($5' \times 2''$) среднего разрешения Галактических шаровых скоплений были получены при нескольких фиксированных положениях щели. Во всех случаях щель проходила через центр скопления и через максимально населенные звездами области. Фоновые объекты со скоростями и распределениями энергии, существенно отличающимися от средних для основной массы звезд скоплений, не были включены в результирующие интегральные спектры.

Процесс обработки наблюдений был аналогичен описанному, например, в статьях [11, 36]. Для редукции длиннощелевых спектров использовались пакеты программ MIDAS [37] и IRAF [38]. Приведение спектров в шкалу длин волн выполнялось с помощью калибровочных экспозиций HeNe-ламп, полученных в начале и в конце каждой ночи в случае наблюдений на ОНР, и после наблюдений каждого объекта в случае наблюдений на БТА. Дисперсионное соотношение обеспечивало среднюю точность калибровки длин волн порядка 0.16 \AA . Одномерные спектры экстрагированы с помощью процедуры IRAF `apsun`. Вычитание эмиссионных линий неба выполнено с помощью процедуры IRAF `background`. Континуум в одномерных спектрах аппроксимировался с помощью функций MIDAS `filter/maximum` и `filter/smooth` (бегущая медиана). Анализ соответствия наблюдаемых и теоретических спектров выполнялся в графических средах MIDAS и Origin.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты оценки содержаний химических элементов и их погрешности, а также результаты определения металличности, возраста и содержания гелия для исследованных объектов суммированы в таблицах 4–7. Сравнение наблюдаемых и теоретических интегральных спектров скоплений, полученных методом, описанным во введении, показано на рис. 1–5. Среднее отклонение теоретического спектра от наблюдаемого по итогам моделирования составляет $\delta \sim 0.02$ в единицах нормированного континуума. В таблицах с результатами также представлены имеющиеся в литературе значения определяемых параметров. Литературные данные о содержаниях химических элементов для галактических скоплений приведены из работ [43–45], в которых усредняются данные для нескольких ярчайших звезд скоплений — красных гигантов.

Содержание кислорода было оценено нами следующим образом. Углерод в рассматриваемом спектральном диапазоне в основном вносит вклад в интенсивность молекулярных полос $\text{CN } \lambda \sim 4240\text{--}4330 \text{ \AA}$ и $\text{CN } \lambda \sim 4120\text{--}4220 \text{ \AA}$. Вклад различных химических элементов в интенсивность молекулярной полосы CN примерно следующий: C — 51 %, O — 10 %, Mg — 8 %, Ti — 11 %, Si — 6 %, Al — 2 %, Ca — 3 %, Fe — 8 %. В число элементов, влияющих на интенсивность широкой спектральной особенности $\text{CN } \lambda \sim 4120\text{--}4220 \text{ \AA}$, кислород не входит. Помимо C и N на нее значимо влияют Fe, Ti, V и Sr. Наряду с Fe влияние оказывает микротурбулентия. Таким образом, определив содержание углерода, азота и других элементов по всему спектру, можно затем оценить содержание кислорода с использованием полосы $\text{CN } \lambda \sim 4240\text{--}4330 \text{ \AA}$.

Рисунки 6 и 7 для каждого из галактических скоплений выборки демонстрируют соответствие между наблюдаемыми CMD и подобранными нами с помощью анализа интегральных спектров теоретическими изохронами звездной эволюции [17]. Можно сделать вывод, что, несмотря на неполное соответствие между теоретическими изохронами и наблюдаемыми данными, изохроны, приведенные на рисунках, позволяют воспроизвести наблюдаемые спектральные особенности и следуют наблюдаемому распределению звезд на CMD. Особенно важным является воспроизведение наблюдаемых светимости и цвета звезд точки поворота главной последовательности (далее: MSTO) и RGB. Красные гиганты являются наиболее многочисленными из ярчайших звезд скопления. Наклон ветви красных гигантов для низкометаллических скоплений ($[\text{Fe}/\text{H}] < -0.7 \text{ dex}$) определяется в основном металличностью [47]. Светимость и цвет звезд MSTO характеризуют возраст скопления. На рис. 6 и 7 видно, что изохроны [17], подобранные при моделировании спектров нашим методом, во многих случаях лишь качественно описывают светимость и цвет звезд НВ. Как было показано в статье [14], определяющим фактором для достижения наилучшего модельного описания наблюдаемых спектров является согласие между наблюдаемыми и теоретическими данными об относительном числе и светимости звезд в разных эволюционных стадиях. В синтетических спектрах скоплений, рассчитанных нашим методом, аккуратно воспроизведено число звезд данной светимости, температуры и $\lg g$ на горизонтальной ветви по отношению к числу звезд в других эволюционных стадиях, в частности, в стадии красных гигантов. Необходимо, наконец, отметить, что нижняя часть главной последовательности (слабее $I = 5 \text{ mag}$) не описывается удовлетворительно изохронами ни для одного из скоплений

Таблица 4. Логарифм возраста в годах, содержание гелия (Y) и металличность $[Fe/H]$ в dex для шаровых скоплений в окрестности M31. В колонке 5 даны средние для скоплений значения скорости микротурбулентции, ξ_{turb} в km s^{-1} использованные нами для расчетов синтетических спектров скоплений

| Объект | $\lg T$ | Y | $[Fe/H]$ | ξ_{turb} | Ссылка |
|-----------|------------------|-----------------|------------------|---------------------|--------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| [SD09]GC7 | 10.0 ± 0.1 | 0.30 ± 0.03 | -1.8 ± 0.1 | 1.8 | This work |
| | 9.9 ± 0.12 | — | -1.5 ± 0.2 | | Sharina and Davoust [24] |
| | — | — | -1.8 ± 0.3 | | Veljanoski et al. [26] |
| MayallIII | 10.15 ± 0.05 | 0.26 ± 0.02 | -1.00 ± 0.05 | 2.1 | this work |
| | 10.176 | — | -0.95 ± 0.09 | | Meylan et al. [29] |
| | 10.08 | — | — | | Ma et al. [39] |
| | — | — | -1.08 ± 0.09 | | Huchra et al. [40] |
| MGC 1 | 10.0 ± 0.05 | 0.30 ± 0.03 | -2.20 ± 0.1 | 2.2 | this work |
| | 9.7 ± 0.1 | — | — | | Ma [41] |
| | — | — | -2.14 | | Mackey et al. [23] |
| Bol 298 | 10.0 ± 0.1 | 0.30 ± 0.03 | -1.85 ± 0.1 | 1.8 | this work |
| | 10.134 | — | -2.07 ± 0.18 | | Fan et al. [42] |
| | 10.3 ± 0.1 | — | — | | Ma [41] |
| | — | — | -2.14 | | Mackey et al. [23] |

нашей выборки. Это свойство изохрон, однако, не влияет на качество моделирования спектров вследствие малого вклада слабых звезд в интегральный спектр [10]. Дополнительно вопросы соответствия наблюдаемых и теоретических эволюционных последовательностей на CMD будут обсуждаться в разделе 3.1.

Тестом для проверки качества моделирования спектров шаровых скоплений могут служить спектры скоплений нашей Галактики, для которых имеются глубокие CMD, а также литературные результаты измерения содержаний элементов по спектрам высокого разрешения отдельных звезд. В таблице 5 выполнено сравнение наших оценок возраста, $[Fe/H]$ и Y с литературными значениями из каталога Харриса [25] и статьи Ванденберга [22]. Ванденберг определял эти параметры с использованием публично доступных данных глубокой звездной фотометрии на снимках HST и собственных моделей звездной эволюции Victoria-Regina, созданных с учетом содержания элементов альфа-процесса. Из таблицы 5 видно, что в ряде случаев имеются различия между нашими и литературными оценками в пределах определяемых параметров.

Типичные ошибки измерения $[Fe/H]$ нашим методом с использованием интегральных спектров среднего разрешения составляют 0.1 dex. Ошибки определения возраста и содержания гелия с использованием водородных линий поглощения составляют примерно 1 млрд. лет и 3% соответственно. Данные ошибки определяются, в основном, отношением сигнал—шум в наблюдаемых спектрах, а также выбором используемых для моделирования изохрон звездной эволюции [17].

Из таблицы 7 видно, что имеется согласие между нашими и литературными оценками содержаний элементов в пределах заявленных ошибок во всех случаях, за исключением следующих: i) систематические различия между литературными и оцененными нами содержаниями C и N; ii) немногочисленные различия по отдельным элементам, значительно превосходящие заявленные точности (например, различия между литературными и оцененными нами значениями содержания Mg для NGC 6341). Одной из наиболее вероятных причин различий наших и литературных значений содержаний является то обстоятельство, что мы изучаем спектры скоплений в целом, а не только ярких звезд-гигантов, как делают многие другие исследователи. В таких звездах химический состав может

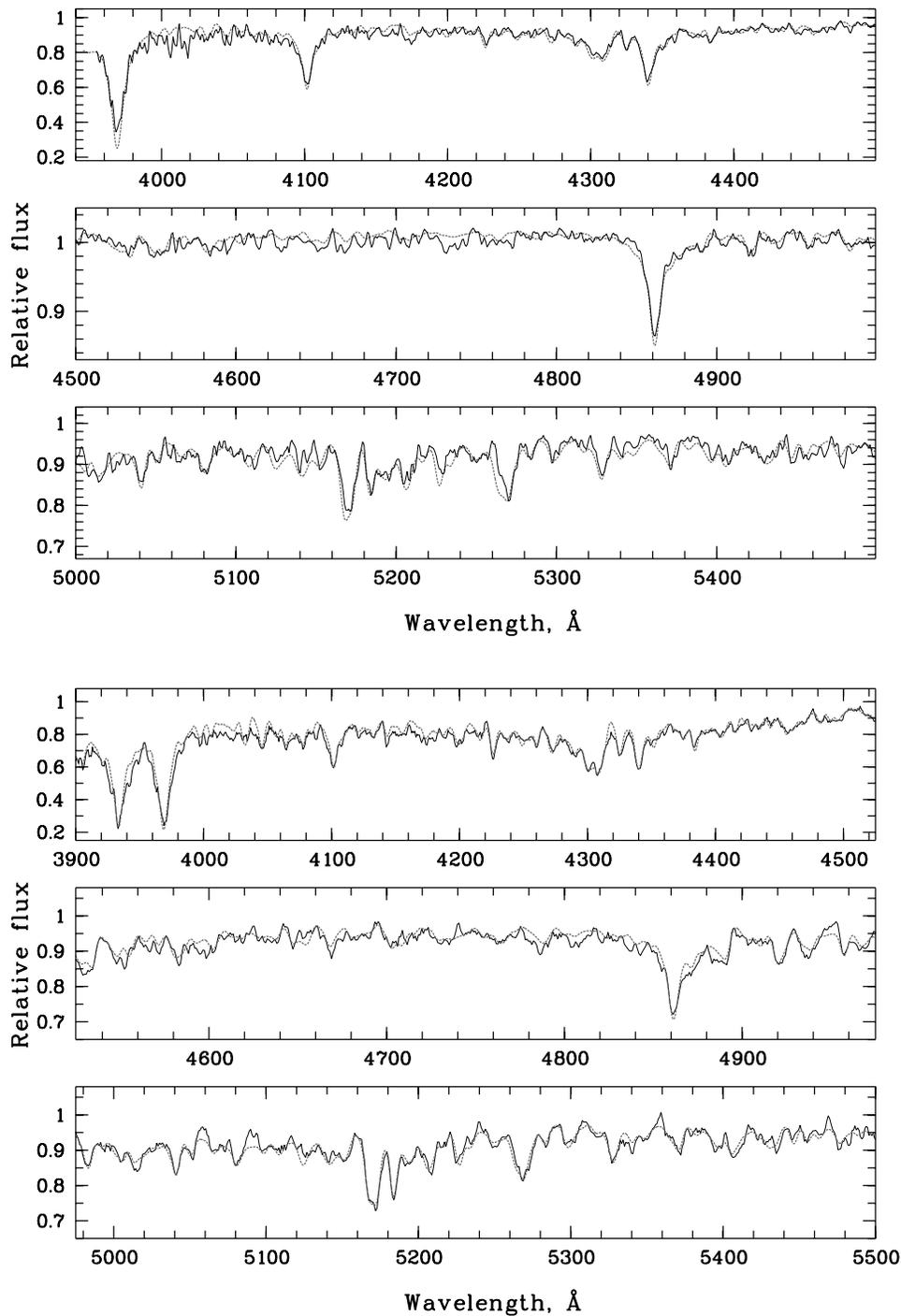


Рис. 1. Сравнение интегральных спектров шаровых скоплений [SD2009]GC7 (верх) и Mayall II (низ) с модельными спектрами (показаны пунктирными линиями), рассчитанными с использованием определенных нами эволюционных параметров из таблицы 4 и содержаний элементов из таблицы 6.

значительно отличаться от среднего для скопления вследствие выноса на поверхность звезд-гигантов продуктов ядерных реакций, происходящих в их недрах.

Систематические различия между содержания-

ми С и N, определенными по суммарным спектрам звезд скоплений и спектрам высокого разрешения отдельных ярчайших звезд этих объектов, были интерпретированы нами как результат хорошо известного в литературе эффекта перемешивания

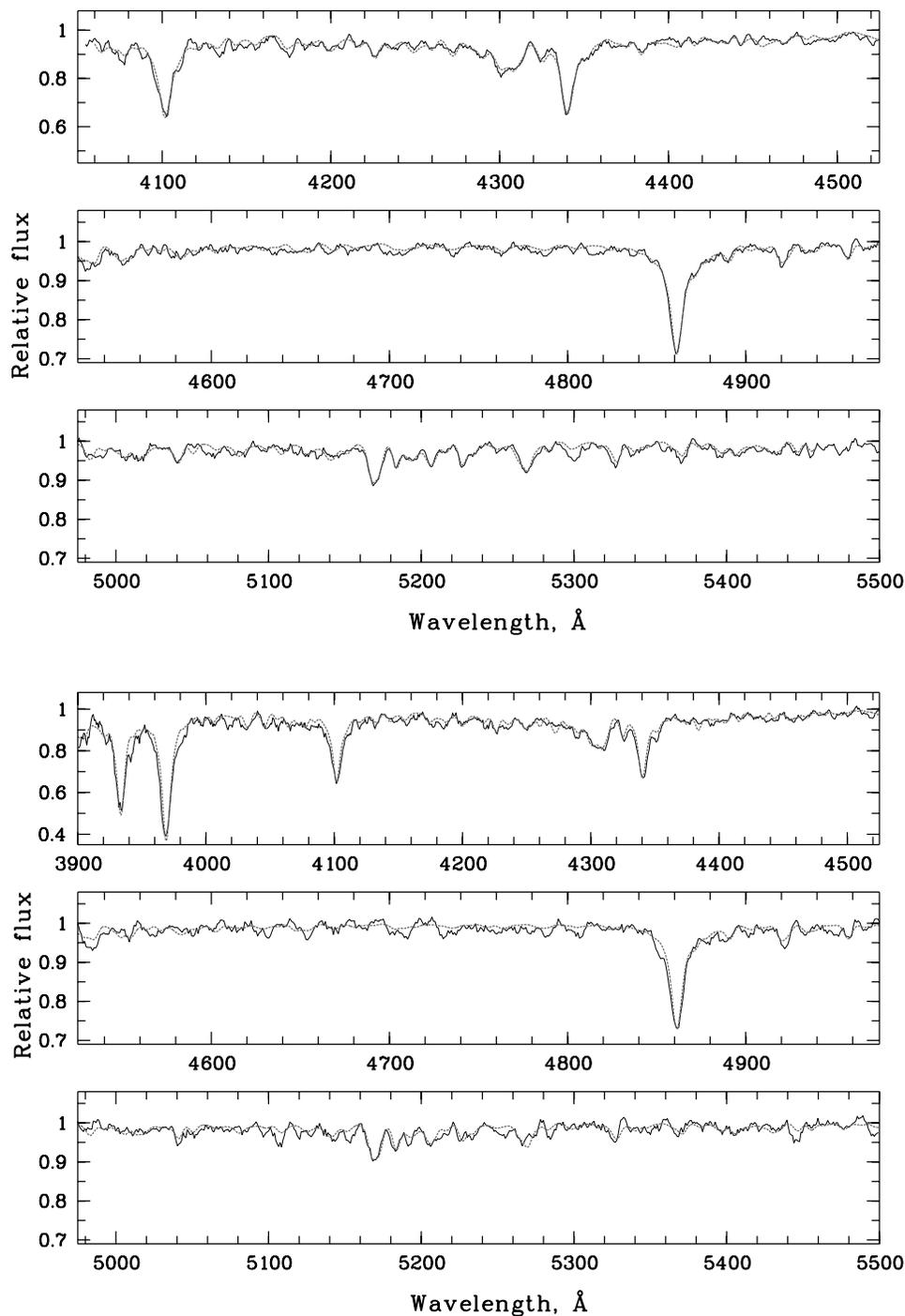


Рис. 2. То же, что и на рис. 1 для шаровых скоплений MGC 1 (верх) и Vol 298 (низ).

в атмосферах красных гигантов [48]. Вещество, прошедшее полный CNO цикл в звездных недрах, поставляется в атмосферу звезды конвективными процессами. В результате C и O оказываются обедненными в спектрах красных гигантов, а N и Mg, наоборот, усиленными, по сравнению со звездами на главной последовательности и SGB.

Заметим, что для таких химических элементов, как Fe, Mg, Ca, C, точность определения содержаний соответствует точности предсказаний современной теории химической эволюции нашей Галактики (например, [49–52] и ссылки в этих статьях).

Несомненно, различия между литературными и нашими содержаниями могут быть отчасти связаны

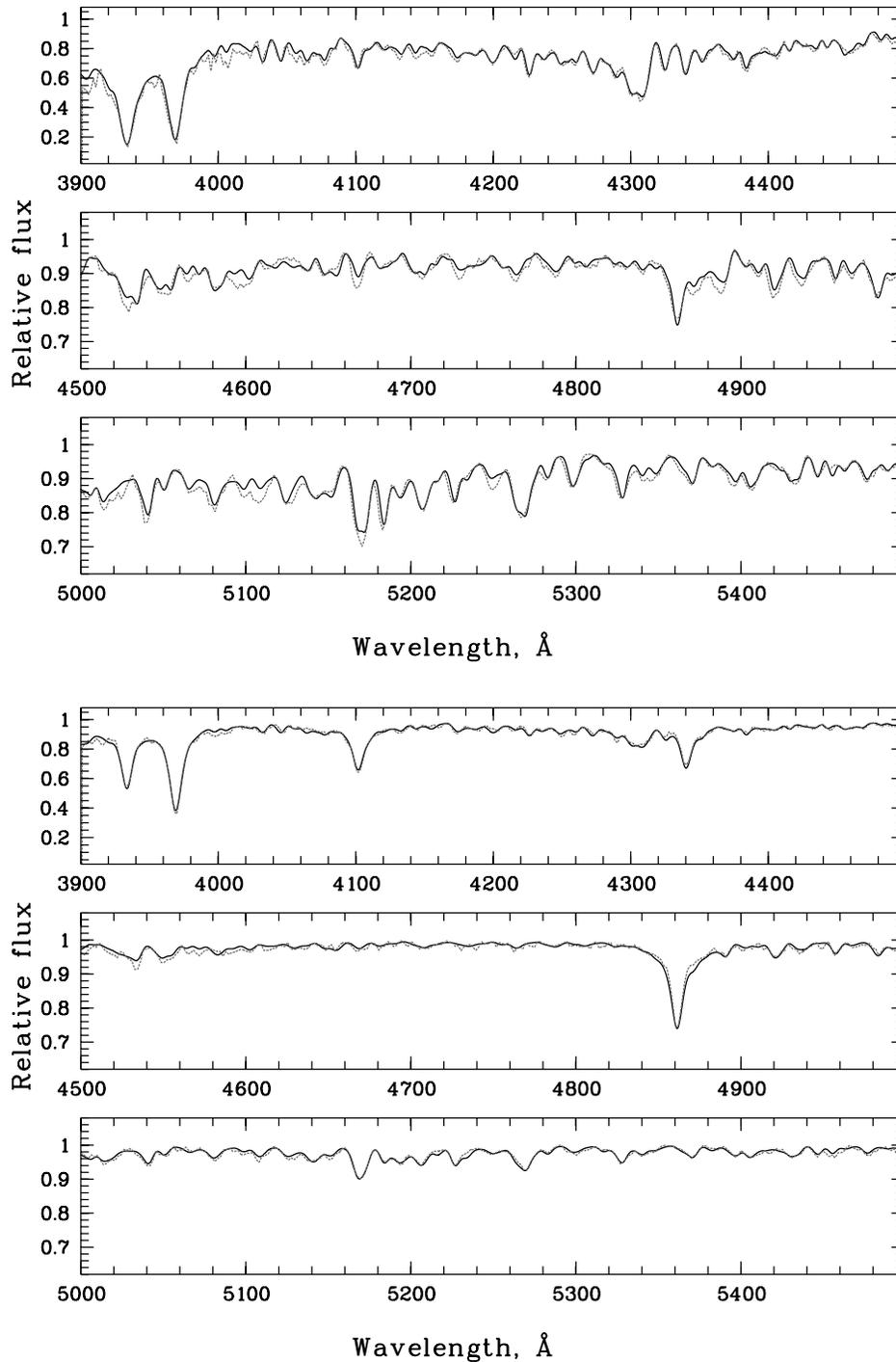


Рис. 3. Сравнение интегральных спектров шаровых скоплений Галактики NGC 6838 (верх) и NGC 6341 (низ), полученных при наблюдениях в обсерватории Верхнего Прованса, с модельными спектрами (показаны пунктирными линиями), рассчитанными с использованием определенных нами эволюционных параметров из таблицы 5 и содержаний элементов из таблицы 7.

с особенностями применяемых методик. Например, различиями в используемых списках линий и атомных константах, способе нормировки континуума в наблюдаемом спектре. При нормировании спектра

остается неисправленная высокочастотная составляющая вариации континуума. Она может быть обусловлена, в частности, не до конца исправленной попиксельной вариацией чувствительности

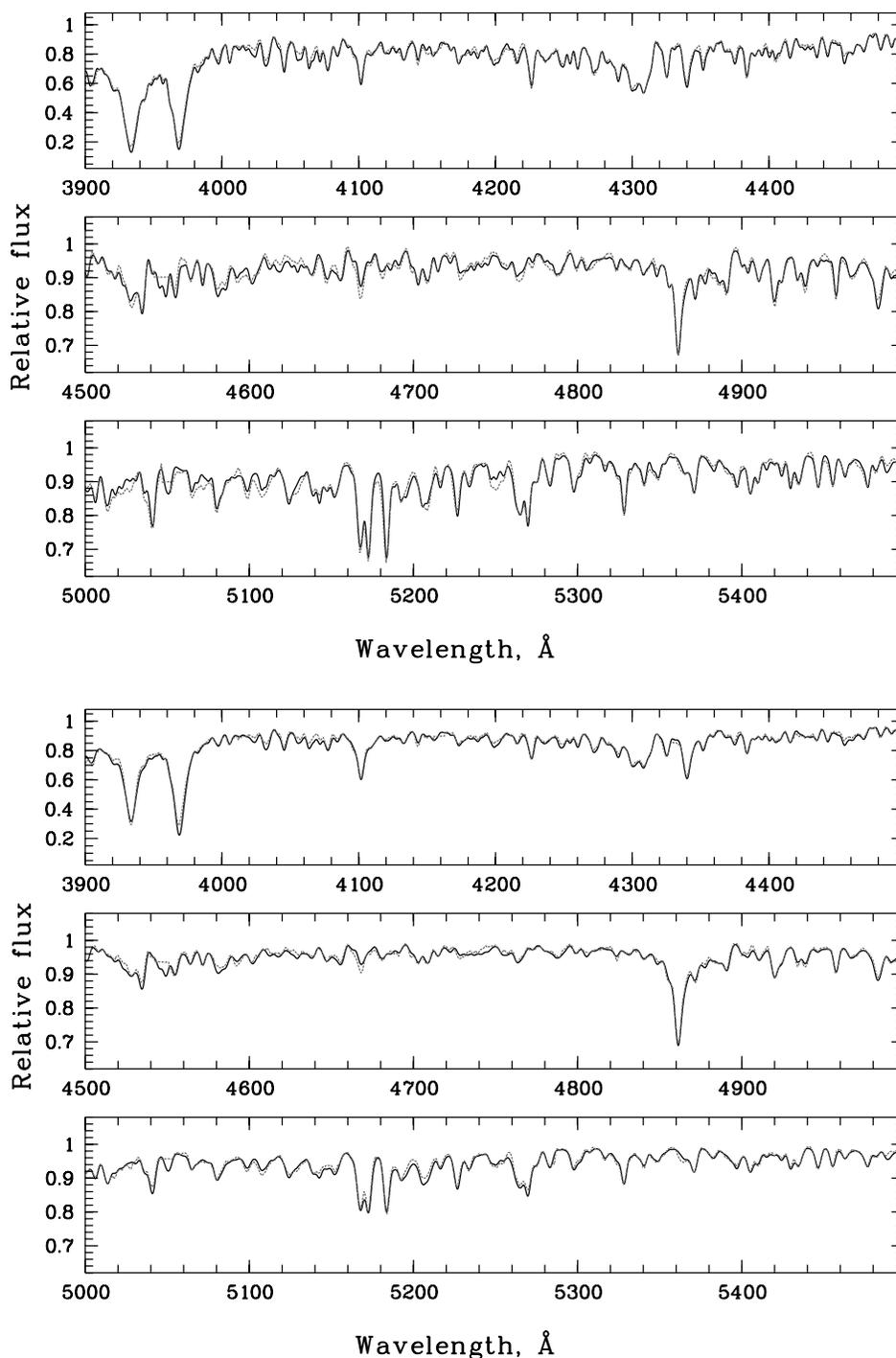


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для спектров NGC 104 (верх) и NGC 6121 (низ) из [35].

прибора. При анализе, производимом с использованием интегральных спектров, необходимо учитывать вероятность непредвиденных изменений в спектрах, обусловленных вкладом фоновых звезд. Стохастические флуктуации числа звезд скопления, принадлежащих разным эволюционным стадиям и попадающим в интегральный спектр, ока-

зывают влияние на качество оцениваемых параметров. Данные замечания относятся не только к нашим, но и к литературным результатам.

3.1. Замечания об отдельных объектах

NGC 104 (47 Tuc) — одно из самых ярких, компактных и близких к Солнцу шаровых скоп-

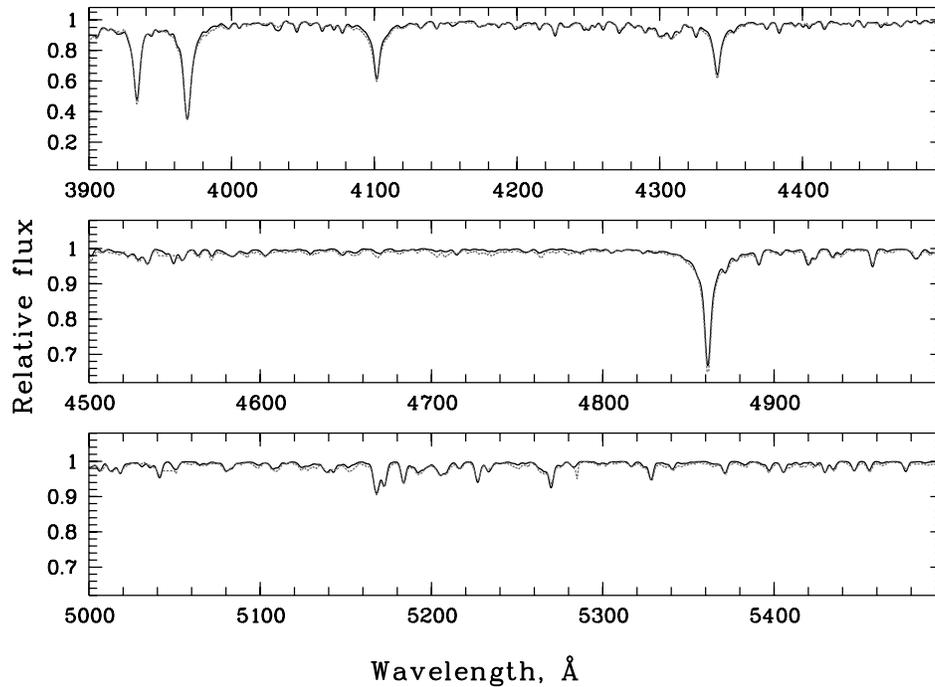


Рис. 5. То же, что на предыдущем рис. 4, но для NGC 7078 с наблюдаемым спектром из [35].

Таблица 5. Возраст (T) в млрд. лет, содержание гелия (Y) и металличность $[Fe/H]$ в dex для Галактических шаровых скоплений. Литературные данные взяты из работ [25] («Н») и [22] («VdB»). В последней строке даны оцененные нами средние для скоплений значения скорости микротурбуленции (ξ_{turb}) в km s^{-1}

| Параметр/ Объект | N 6838 | N 104 | N 6121 | N 6341 | N 7078 |
|-----------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| $[Fe/H]^H$ | -0.73 | -0.76 | -1.2 | -2.31 | -2.26 |
| $[Fe/H]^{VdB}$ | -0.82 | -0.76 | -1.18 | -2.35 | -2.33 |
| T^{VdB} | 11.00 | 11.75 | 11.50 | 12.75 | 12.75 |
| Y^{VdB} | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| $T_{\text{sp}}^{\text{our}}$ | 11.2 | 8.9 | 12.6 | 11.2 | 14.1 |
| $Y_{\text{sp}}^{\text{our}}$ | 0.26 | 0.30 | 0.30 | 0.26 | 0.26 |
| $[Fe/H]_{\text{sp}}^{\text{our}}$ | -1.15 | -1.0 | -1.4 | -1.8 | -2.35 |
| ξ_{turb} | 2.0 | 2.4 | 1.9 | 2.0 | 2.1 |

лений Галактики. Объект характеризуется сложной внутренней кинематикой и большой дисперсией скоростей звезд [53]. Na–O антикорреляции были открыты Карретта и др. [54]. Бругард и др. [55], используя данные наземной фотометрии и Хаббловского космического телескопа

(HST), определили для объекта возраст в пределах 10.4–13.4 млрд. лет с наилучшим значением 11.8 млрд. лет, металличность $[Fe/H] \sim -0.70$, $[O/Fe] \sim 0.60$, и $Y \sim 0.25$ в солнечной шкале содержаний, заданной Асплунд, Гревессе и Сауваля [56]. Авторы, однако, отметили, что модельная шкала эффективных температур оказалась на 50–75 K холоднее, чем таковая по их собственным оценкам. Колуччи и др. [57] определили следующие содержания элементов по интегральному спектру NGC 104 высокого разрешения: $[Mg/Fe] = 0.29$; $[Ca/Fe] = 0.18$; $[Ti I/Fe] = 0.05$; $[Ti II/Fe] = 0.27$; $[Cr/Fe] = -0.07$. Здесь перечислены лишь результаты из [57] по общим с нашей работой элементам. Данные содержания, кроме, пожалуй, $[Ti I/Fe]$ и $[Cr/Fe]$, оказываются ближе к оценкам Рёдингер и др. [44], чем к нашим значениям (таблица 7). В статье Рёдингер и др. [44] приведены усредненные содержания для нескольких ярчайших звезд скоплений. Результаты Колуччи и др. [57] для Ti I и Ti II не согласуются друг с другом (см. возможное объяснение в статье [57]). Данные авторы анализировали интегральные спектры внегалактических шаровых скоплений высокого разрешения с помощью моделей звездных атмосфер. Они заметили существующие систематические различия между содержаниями, определенными по суммарным спектрам звезд скоплений и спектрам высокого разрешения ярчайших звезд этих объектов из литературы, но не дали этому

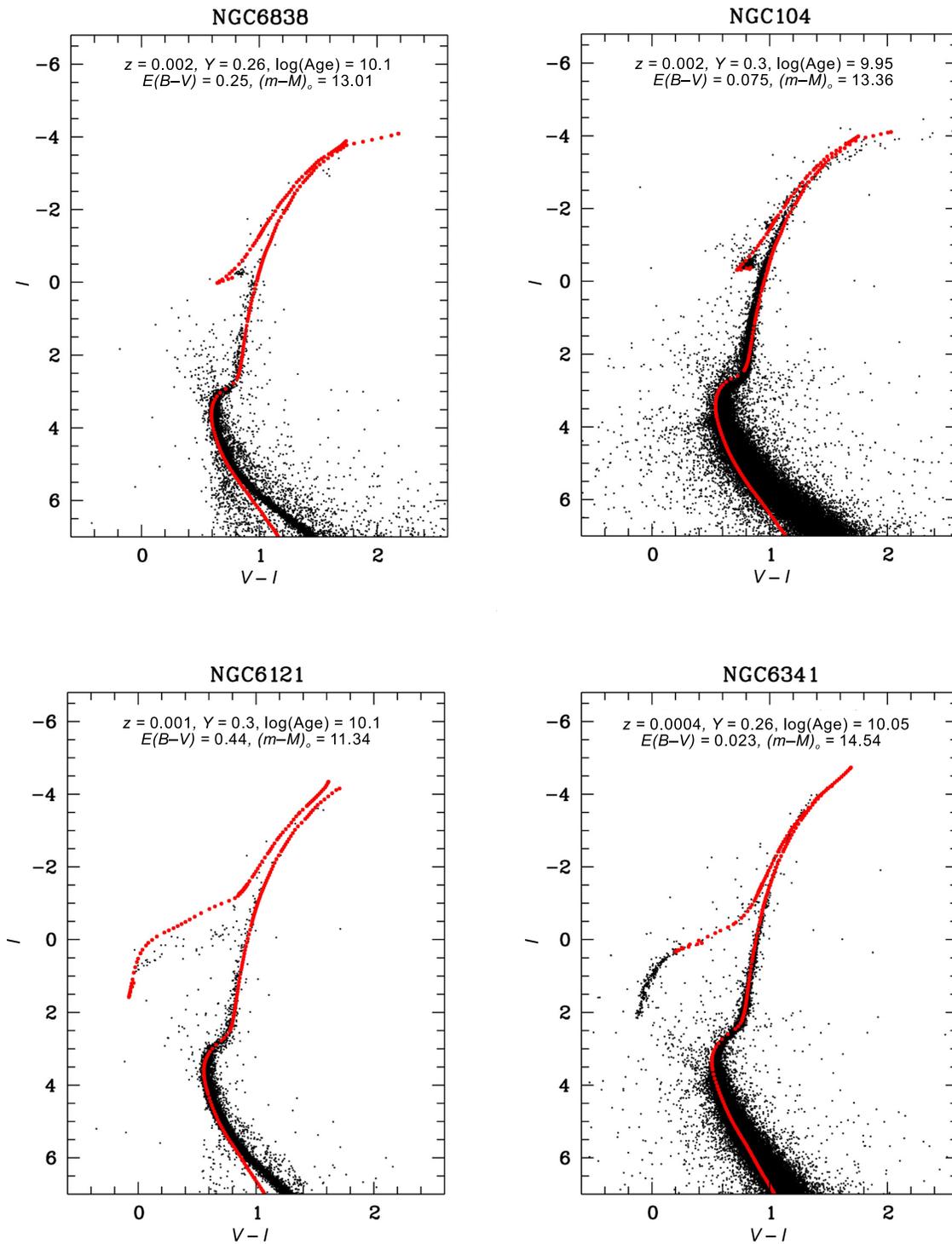


Рис. 6. Сравнение CMD скоплений NGC 6838, NGC 104, NGC 6121 и NGC 6341 (данные из работы Сараджедини и др. [46]) с изохронами Бертелли и др. [17].

Таблица 6. Определенные содержания $[X/Fe]$ в dex и ошибки содержаний σ в dex химических элементов в [SD2009]GC7, Mayall II, MGC 1 и Vol 298. В столбце 3 приведены значения из работы [16], полученные по интегральным спектрам высокого разрешения (L18)

| Элем. | [SD09]GC7 | [SD09]GC7 (L18) | Mayall II | MGC 1 | Vol 298 |
|-------|---------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | $[X/Fe] \pm \sigma$ | | | | |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| C | 0.05 ± 0.20 | — | 0.30 ± 0.15 | -0.25 ± 0.15 | 0.20 ± 0.15 |
| N | 0.50: | — | 0.50 ± 0.30 | 0.00 ± 0.30 | 0.40 ± 0.30 |
| O | 0.50 ± 0.30 | — | 0.40 ± 0.30 | 0.40 ± 0.30 | 0.40 ± 0.30 |
| Mg | 0.25 ± 0.15 | 0.532 ± 0.396 | 0.50 ± 0.15 | 0.10 ± 0.15 | 0.25 ± 0.15 |
| Ca | 0.50 ± 0.15 | 0.364 ± 0.137 | -0.05 ± 0.10 | 0.10 ± 0.10 | 0.05 ± 0.10 |
| Ti | 0.15 ± 0.20 | 0.432 ± 0.146 | -0.10 ± 0.20 | 0.10 ± 0.20 | 0.00 ± 0.20 |
| Cr | 0.05 ± 0.20 | 0.048 ± 0.257 | -0.10 ± 0.20 | -0.10 ± 0.20 | 0.10 ± 0.20 |
| Ni | 0.05 ± 0.30 | 0.195 ± 0.333 | -0.10 ± 0.20 | 0.00 ± 0.20 | 0.00 ± 0.20 |
| Sr | 0.10 ± 0.30 | — | 0.10 ± 0.30 | 0.10 ± 0.30 | 0.10 ± 0.30 |
| Ba | 0.50 ± 0.30 | 0.432 ± 0.341 | -0.10 ± 0.30 | -0.10 ± 0.30 | 0.20 ± 0.30 |

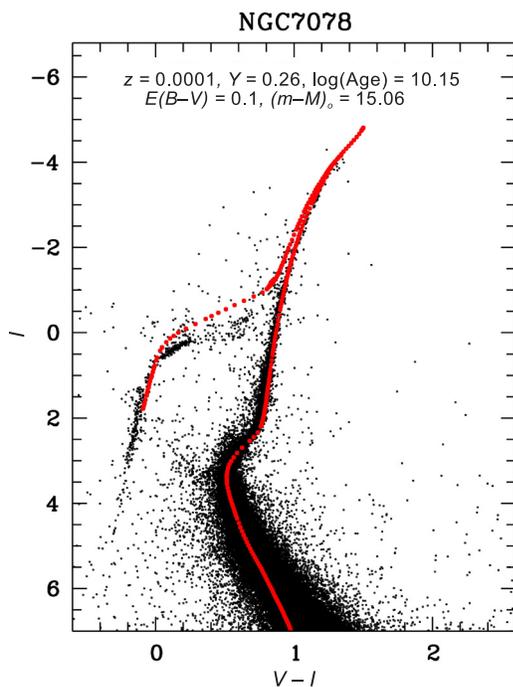


Рис. 7. То же, что на рис. 6, только для NGC 7078.

объяснения. Так как в работе [57] содержания C, N, O не представлены, объяснить существующие различия между нашими оценками содержаний и соответствующими данными этих авторов, затруд-

нительно. Кроме очевидных различий в применяемых методиках возможно влияние стохастических флуктуаций числа звезд скопления, которые могли внести вклад в интегральный спектр. Подобранная нами с помощью моделирования спектра изохрона [17] (рис. 6 верхняя правая панель и легенда в верхней части панели) адекватно описывает цвета и светимости звезд скопления во всех эволюционных стадиях. Наблюдаемые цвета и светимости звезд AGB, однако, не описываются используемой нами изохроной. Возможно, вклад таких звезд в наблюдаемый спектр оказался небольшим.

NGC 6838 (M71) является слабо концентрированным шаровым скоплением, которое раньше принималось за рассеянное из-за малого центрального сжатия, относительно молодого возраста и повышенного содержания металлов по сравнению с типичными галактическими шаровыми скоплениями [58]. Скопление имеет красную горизонтальную ветвь. По оценкам Ди Секко и др. [59], использовавших оригинальную методику трехмерных диаграмм «цвет–цвет–звездная величина», возраст NGC 6838 составляет 12 ± 1 млрд. лет. Na–O антикорреляции открыты в NGC 6838 Рамирез и Кохен [60]. NGC 6838 и NGC 104 относят к популяции толстого диска, или балджа галактики [61], согласно пространственному положению, возрасту и химсоставу. Рисунок 6 показывает, что подобранная нами с помощью моделирования спектра изохрона [17] описывает цвет и светимость звезд скопления во всех эволюционных стадиях. Однако

Таблица 7. Определенные содержания $[X/Fe]$ в dex и ошибки содержаний σ в dex для NGC 6838, NGC 104, NGC 6121, NGC 6341 и NGC 7078. Значения содержаний из работ Прицл и др. [43], Рёдинггер и др. [44] и Меззарос и др. [45] приведены для сравнения

| Элем. | N 6838 | N 6838 (M) | N 104 | N 104 (R) | N 6121 | N 6121 (R) | N 6341 | N 6341 (M) | N 7078 | N 7078 (R) |
|-------|---------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | $[X/Fe] \pm \sigma$ | | | | | | | | | |
| C | 0.40 ± 0.05 | -0.10 ± 0.13 | 0.20 ± 0.15 | -0.13 ± 0.20 | 0.00 ± 0.10 | -0.46 ± 0.28 | -0.30 ± 0.15 | -0.41 ± 0.11 | -0.15 ± 0.15 | -0.30 ± 0.36 |
| N | 0.50 ± 0.15 | 0.91 ± 0.32 | 0.30 ± 0.25 | 0.87 ± 0.55 | 0.90 ± 0.20 | 0.65 ± 0.41 | 0.00 ± 0.20 | 0.93 ± 0.23 | 0.65 ± 0.25 | 0.84 ± 0.63 |
| O | 0.30 ± 0.20 | 0.51 ± 0.09 | 0.10 ± 0.30 | 0.24 ± 0.20 | 0.50 ± 0.30 | 0.31 ± 0.14 | 0.20 ± 0.30 | 0.58 ± 0.19 | 0.45 ± 0.30 | 0.27 ± 0.23 |
| Mg | 0.35 ± 0.05 | 0.38 ± 0.05 | 0.60 ± 0.10 | 0.41 ± 0.14 | 0.50 ± 0.15 | 0.50 ± 0.08 | -0.25 ± 0.10 | 0.11 ± 0.24 | -0.23 ± 0.10 | 0.36 ± 0.23 |
| Ca | 0.35 ± 0.10 | 0.21 ± 0.10 | 0.35 ± 0.10 | 0.17 ± 0.15 | 0.25 ± 0.10 | 0.30 ± 0.09 | 0.00 ± 0.10 | 0.16 ± 0.25 | 0.15 ± 0.10 | 0.31 ± 0.14 |
| Ti | 0.35 ± 0.10 | 0.42 ± 0.09 | 0.20 ± 0.20 | 0.28 ± 0.12 | 0.50 ± 0.20 | 0.31 ± 0.07 | 0.10 ± 0.25 | 0.15 ± 0.08 | 0.20 ± 0.20 | 0.48 ± 0.20 |
| Cr | 0.10 ± 0.20 | - | 0.00 ± 0.20 | 0.10 ± 0.08 | 0.00 ± 0.20 | -0.03 ± 0.07 | -0.20 ± 0.25 | - | -0.20 ± 0.20 | -0.23 ± 0.08 |
| Ni | 0.30 ± 0.30 | - | 0.10 ± 0.20 | - | 0.10 ± 0.20 | - | -0.10 ± 0.25 | - | 0.55 ± 0.20 | - |
| Sr | 0.05 ± 0.30 | - | 0.10 ± 0.20 | - | 0.00 ± 0.20 | - | -0.20 ± 0.25 | - | - | - |
| Ba | 0.35 ± 0.20 | - | 0.10 ± 0.30 | - | 0.30 ± 0.30 | - | -0.20 ± 0.30 | - | 0.00 ± 0.30 | - |

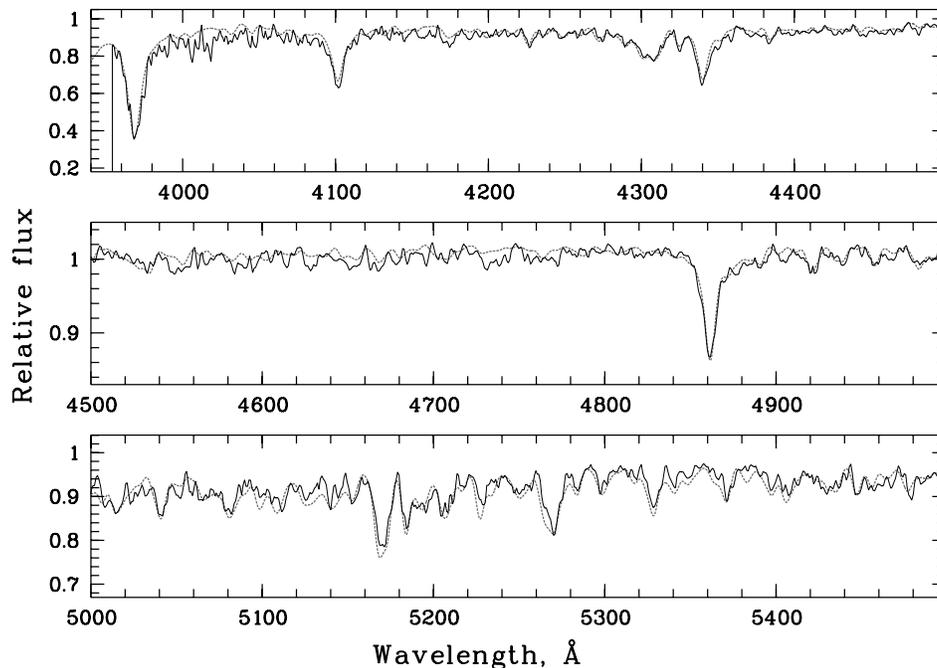


Рис. 8. Сравнение спектров [SD2009] GC7 и NGC 5286 (серая линия) [35].

необходимо отметить, что при данных параметрах НВ продолжается немного дальше, чем наблюдаемая (примерно на 0.2 зв. вел.), в область высоких температур (голубых цветов звезд). Возможно, в интегральный спектр внесли вклад несколько ярких горячих голубых звезд, которые видны на CMD.

NGC 6121 (M4) является самым близким ШС к Солнцу ($R_{\odot} = 2.2$ кpc) [25]. По металличности и типу НВ его относят к молодому гало [61]. Обнаружено, что 40% голубых бродяг (BSS) NGC 6121 являются быстро вращающимися (скорость вращения больше 50 км с^{-1}) [62]. В NGC 6121 обнаружены две звездные популяции, отличающиеся содержанием элементов CNO-цикла ([63] и ссылки в этой статье, [64, 65]). Распределение звезд на НВ NGC 6121 бимодальное — звезды располагаются и слева и справа от пробела Герцшпрунга. RGB скопления мало населена в верхней части (рис. 6). На рис. 6 представлена изохрона, использованная нами для моделирования спектра. Видно, что основные стадии звездной эволюции воспроизводятся правильно. Наблюдаемая горизонтальная ветвь, однако, имеет в среднем меньшую светимость, чем теоретическая, рассчитанная с использованием изохроны [17].

NGC 6341 (M92) — это одно из самых ярких скоплений на северном небе. Признаки множественности звездных населений AGB объекта были

обнаружены Груйтерс и др. [66]. Возраст скопления оценивался в работе [59] с помощью звездной фотометрии на наземных и HST-снимках. Авторы определили возраст 11 ± 1.5 млрд. лет и $Y = 0.248$. Оценки металличности и содержания элементов α -процесса этих авторов отличаются от наших: $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.32$ dex, $[\alpha/\text{Fe}] = 0.3$ dex. О’Маллей и др. [67] оценили абсолютный возраст NGC 6341 в диапазоне 13–13.5 млрд. лет с ошибкой порядка 1.5 млрд. лет, используя данные обзора Gaia. На рис. 6 видно, что наклон ветви красных гигантов, а также светимости звезд в основных эволюционных стадиях хорошо описываются изохроной, подобранной с использованием нашего метода. Однако наличие звезд на голубом конце горизонтальной ветви не описывается данной моделью. По-видимому, небольшое число таких звезд попало в интегральный спектр.

NGC 7078 (M15) — одно из самых низкометаллических ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -2.4$ [48]) и плотных шаровых скоплений нашей Галактики, ядро которого подверглось гравитационному коллапсу [25]. Множественные звездные населения были обнаружены в NGC 7078 в работах [2, 68]. Однако у этого скопления не было открыто множественных ветвей субгигантов, или точек поворота главной последовательности [69]. Цвет и светимость звезд экстремально голубой НВ объекта не описываются достаточно уверенно существующими на сегодняшний день изохронами (рис. 7). Эти звезды, тем не менее,

вносят вклад в наблюдаемый интегральный спектр скопления. Тот факт, что модель, рассчитанная с изохроной с большей светимостью горизонтальной ветви, лучше описывает наблюдаемый спектр, вероятно, обусловлен указанным влиянием на интегральный спектр скопления значительного числа голубых горячих звезд.

Mayall II = G1 [28] — это одно из наиболее массивных шаровых скоплений в Местной группе. Его масса составляет $(8 \pm 1) \times 10^6 M_{\odot}$ [70]. Согласно результатам сравнения звездных величин скопления во многих фильтрах с моделями популяционного синтеза [39], объект содержит большое число горячих голубых звезд экстремально голубой НВ с суммарной светимостью $(1.65 \pm 0.63) \times 10^2 L_{\odot}$. Согласно [39] скопление сформировалось примерно 1.7 млрд. лет после Большого Взрыва. По нашим данным оно примерно на 1.9 млрд. лет моложе (таблица 4). Металличность объекта, определенная в литературе разными методами (таблица 4), согласуется с нашей оценкой, а также с содержанием металлов у шаровых скоплений NGC 6121, NGC 104 и NGC 6838. Морфология горизонтальной ветви у Mayall II сходна с таковой у NGC 6121, согласно [31]. Однако содержания химических элементов у этих двух скоплений различны (таблицы 6 и 7).

MGC 1 (таблица 1) открыто Макей и др. [23]. Этими авторами были получены глубокие CMD по результатам звездной фотометрии на снимках с HST для 10 шаровых скоплений в гало M31. В этой статье были определены структурные и фотометрические параметры, а также металличность $[Fe/H]$ исследуемых объектов. Скопление Vol 298 также исследовалось в работе [23]. Открыто оно было в 2000 году Бармби и соавторами [33]. Сравнение определенных нами $[Fe/H]$ и возраста для Vol 298 и MGC 1 с результатами других авторов приведено в таблице 4. Голубая и красная части НВ скоплений богато населены звездами [23, 31]. Таким образом, НБР индекс и металличность $[Fe/H]$ у Vol 298 и MGC 1 похожи на таковые у NGC 7078 (таблицы 1, 4, 5). Однако содержания химических элементов у этих трех скоплений различны (таблицы 6, 7). Повышенное значение Y и пониженное содержание Mg, обнаруженные нами у Vol 298 и MGC 1, указывают на возможные вариации в содержаниях легких элементов среди звезд этих объектов [71]. Полагают, что звезды второй популяции в шаровых скоплениях образуются из вещества, обогащенного продуктами СНО-цикла звезд первой популяции. У таких звезд наблюдается, как правило, повышенное содержание гелия. На стадии главной последовательности эволюция богатых гелием звезд происходит быстрее, чем у звезд с обычным содержанием гелия. В районе MSTO и на более

поздних стадиях эволюции эти звезды являются менее массивными.

Для скопления [SD09]GC7 звездная фотометрия до настоящего времени не выполнялась. Ларсен и др. [16] определили содержания Mg, Ca, Ti, Cr, Ni и Ba по интегральному спектру высокого разрешения скопления, полученному на телескопе Кеск I. Как видно из сравнения в таблице 6, содержания в целом согласуются с нашим в пределах ошибок их измерения, кроме содержания Mg, которое оказалось намного выше по данным Ларсен и др. [16]. Авторы получили более низкую металличность объекта: $[Fe/H] = -2.057 \pm 0.111$. Рисунок 8 показывает сравнение спектров [SD09]GC7, полученного в работе [24], и использованного в данной работе, и спектра NGC 5286 из библиотеки [35]. Видно, что спектры похожи по форме и интенсивности линий металлов. Глубины линий H δ и H γ в спектре NGC 5286 меньше, что свидетельствует о большем возрасте этого галактического скопления. По нашим оценкам возраст [SD09]GC7 — 10 млрд. лет (таблица 4), а NGC 5286 — 12.6 млрд. лет (таблица 4 в статье [14]). NGC 5286 — это объект с фотометрически измеренной металличностью $[Fe/H] \sim -1.67$ dex [25]. Шарина и Давуст определили для [SD09]GC7 $[Fe/H] \sim -1.6 \pm 0.2$ dex [24]. В предыдущей статье [14] мы получили для NGC 5286 значение $[Fe/H] \sim -1.75 \pm 0.2$ dex. Таким образом, наши результаты измерения металличности для [SD09]GC7 являются вполне правдоподобными. Пользуясь сходством спектров NGC 5286 и [SD09]GC7, можно сравнить оцененные нашим методом содержания Mg. Для NGC 5286 мы получили $[Mg/Fe] = 0.38 \pm 0.1$ dex [14]. Данная оценка ближе к результату Ларсен и др. [16]: $[Mg/Fe] = 0.532 \pm 0.396$. В работе [14] для пяти галактических шаровых скоплений с похожими спектрами среднего разрешения содержание $[Mg/Fe]$ варьировалось в диапазоне от 0.14 до 0.38. Таким образом, значение $[Mg/Fe] = 0.25$ для [SD09]GC7 является вполне приемлемым. Напомним, что результат измерения содержания элементов зависит и от заданного значения скорости микротурбулентции (см. раздел 1).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Таблицы 1, 4–7 показывают (см. также [72]), что среди объектов рассмотренной нами выборки нет похожих по химическим и другим характеристикам. Различия в содержаниях легких элементов между скоплениями со сходными $[Fe/H]$ и возрастом могут достигать 0.5–0.6 dex. Соответствующие различия для других элементов — в 2–3 раза меньше.

Отчасти, данные различия связаны с вариациями в содержаниях легких элементов в атмосферах красных гигантов скоплений. В этих звездах высокой светимости сильны конвективные процессы переноса элементов, производимых в недрах, в поверхностные слои атмосфер.

Система шаровых скоплений М31 простирается гораздо дальше от ее центра, чем таковая у нашей Галактики [25, 73–75]. Металличности и возрасты скоплений в пределах и окрестностях М31 определялись в основном с использованием фотометрических данных и Ликских индексов ([76] и ссылки в этой статье). Скиавон и др. [77] впервые показали, что существует корреляция между массами шаровых скоплений и средним содержанием в них азота, что интерпретируется как свидетельство влияния процессов обратной связи (feedback) на истории звездообразования и обогащения химическими элементами шаровых скоплений. Наша выборка мала для того, чтобы делать выводы о наличии такой корреляции для ее объектов. К тому же данная зависимость оказывается более сложной из-за того, что среднее содержание азота сильнее коррелирует с общей металличностью скопления, чем с массой. Чем выше металличность, тем выше среднее содержание азота в звездах скопления при фиксированной массе [77].

Колуччи и др. [8] открыли существование корреляций между содержаниями Са, Mg и Na, светимостями скоплений и дисперсиями скоростей в них, что может свидетельствовать о процессах самообогащения, действующих в формирующихся шаровых скоплениях. Колуччи и др. [8, 78] сообщали об измерении содержаний элементов Са, Si, Ti, Mg, Na и Al в шаровых скоплениях М31 на основании анализа их интегральных спектров высокого разрешения. К сожалению, в нашей выборке нет объектов, общих с этой работой для того, чтобы провести сравнение. Колуччи и др. [8] обнаружили, что шаровые скопления их выборки, находящиеся на расстоянии более 20 кпк от М31, имеют примерно постоянную металличность $[Fe/H] \sim -1.6$ dex. Все четыре скопления нашей выборки расположены на больших расстояниях от М31 (таблица 4), однако металличности их не равны $[Fe/H] = -1.6$ dex (таблица 6), согласно как нашим, так и литературным оценкам.

В трех скоплениях в окрестности М31 ([SD2009] GC7, MackeyGC 1 и Bol 298) нами обнаружено повышенное содержание гелия ($Y = 0.30$), что может свидетельствовать о наличии вариаций в содержаниях легких элементов среди звезд этих объектов [71] (см. также обсуждение в предыдущем разделе). Повышенное Y также найдено нами для галактических скоплений NGC 104 и NGC 6121.

Мы обнаружили пониженное содержание Mg у ряда наиболее низкометаллических объектов выборки (NGC 6341, NGC 7078, [SD09] GC7, MGC 1) (таблицы 6, 7). Данная картина не типична для звезд поля нашей Галактики, имеющих низкую металличность. Колуччи и др. [8] сделали вывод о наличии вариаций в содержаниях легких элементов в анализируемых ими интегральных спектрах шаровых скоплений М31, исходя из пониженных содержаний Mg и O и повышенных содержаний Al и Na. Авторы считают, что наличие вариаций в содержаниях легких элементов у звезд исследуемых объектов, определенных по спектрам интегрального излучения шаровых скоплений, является результатом высокотемпературных процессов нуклеосинтеза с захватом протонов.

Полученные в данной статье оценки возраста и металличности скоплений не противоречат общей зависимости «возраст–металличность–галактоцентрический радиус» ([67] и ссылки в этой статье). Согласно этой зависимости, более далекие от центра Галактики объекты являются также более старыми и низкометаллическими.

Эффективность развиваемой нами методики определения возраста, удельного содержания гелия и химического состава с использованием спектров суммарного излучения шаровых скоплений продемонстрирована в этой работе на примере нескольких шаровых скоплений нашей Галактики и окрестности М31.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при содействии гранта РФФИ 18-02-00167. ВВШ благодарит грант РФФИ 16-02-01145. Авторы благодарят анонимного рецензента за комментарии, которые позволили улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. G. Gratton, E. Carretta, and A. Bragaglia, *Astron. Astrophys. Rev.* **20**, 50 (2012).
2. G. Piotto, A. P. Milone, L. R. Bedin, et al., *Astron. J.* **149**, 91 (2015).
3. E. Carretta, A. Bragaglia, R. G. Gratton, et al., *Astron. and Astrophys.* **516**, A55 (2010).
4. A. F. Marino, A. P. Milone, A. I. Karakas, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450**, 815 (2015).
5. A. P. Milone, A. F. Marino, F. D'Antona, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 4363 (2017).
6. N. Bastian, I. Cabrera-Ziri, F. Niederhofer, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 4795 (2017).
7. P. Goudfrooij, L. Girardi, and M. Correnti, *Astrophys. J.* **846**, 22 (2017).
8. J. E. Colucci, R. A. Bernstein, and J. G. Cohen, *Astrophys. J.* **797**, 116 (2014).

9. G. Chabrier, *Astrophysics and Space Science Library* **327**, 41 (2005).
10. M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and E. Davoust, *Astronomy Reports* **57**, 410 (2013).
11. D. A. Khamidullina, M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and E. Davoust, *Astrophysical Bulletin* **69**, 409 (2014).
12. D. A. Khamidullina, M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and E. Davoust, *Baltic Astronomy* **23**, 260 (2014).
13. M. E. Sharina, C. J. Donzelli, E. Davoust, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A48 (2014).
14. M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and A. Y. Kniazev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471**, 1955 (2017).
15. C. Conroy, A. Villaume, P. G. van Dokkum, and K. Lind, *Astrophys. J.* **854**, 139 (2018).
16. S. S. Larsen, J. P. Brodie, A. Wasserman, and J. Strader, *Astron. and Astrophys.* **613**, A56 (2018).
17. G. Bertelli, L. Girardi, P. Marigo, and E. Nasi, *Astron. and Astrophys.* **484**, 815 (2008).
18. R. G. Gratton, E. Carretta, A. Bragaglia, et al., *Astron. and Astrophys.* **517**, A81 (2010).
19. V. V. Shimansky, N. V. Borisov, and N. N. Shimanskaya, *Astronomy Reports* **47**, 763 (2003).
20. L. Malavolta, C. Sneden, G. Piotto, et al., *Astron. J.* **147**, 25 (2014).
21. W. Chantereau, C. Charbonnel, and G. Meynet, *Astron. and Astrophys.* **592**, A111 (2016).
22. D. A. Vandenberg, K. Brogaard, R. Leaman, and L. Casagrande, *Astrophys. J.* **775**, 134 (2013).
23. A. D. Mackey, A. Huxor, A. M. N. Ferguson, et al., *Astrophys. J.* **655**, L85 (2007).
24. M. Sharina and E. Davoust, *Astron. and Astrophys.* **497**, 65 (2009).
25. W. E. Harris, *Astron. J.* **112**, 1487 (1996).
26. J. Veljanoski, A. M. N. Ferguson, A. D. Mackey, et al., *Astrophys. J.* **768**, L33 (2013).
27. A. R. Conn, R. A. Ibata, G. F. Lewis, et al., *Astrophys. J.* **758**, 11 (2012).
28. N. U. Mayall and O. J. Eggen, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **65**, 24 (1953).
29. G. Meylan, A. Sarajedini, P. Jablonka, et al., *Astron. J.* **122**, 830 (2001).
30. J. Ma, R. de Grijs, D. Chen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **376**, 1621 (2007).
31. S. Perina, M. Bellazzini, A. Buzzoni, et al., *Astron. and Astrophys.* **546**, A31 (2012).
32. R. M. Rich, C. E. Corsi, C. Cacciari, et al., *Astron. J.* **129**, 2670 (2005).
33. P. Barmby, J. P. Huchra, J. P. Brodie, et al., *Astron. J.* **119**, 727 (2000).
34. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
35. R. P. Schiavon, J. A. Rose, S. Courteau, and L. A. MacArthur, *Astrophys. J. Suppl.* **160**, 163 (2005).
36. D. I. Makarov, M. E. Sharina, V. E. Karachentseva, and I. D. Karachentsev, *Astron. and Astrophys.* **581**, A82 (2015).
37. K. Banse, P. Crane, P. Grosbol, et al., *The Messenger* **31**, 26 (1983).
38. D. Tody, *ASP Conference Series* **52**, 173 (1993).
39. J. Ma, R. de Grijs, Z. Fan, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics* **9**, 641 (2009).
40. J. P. Huchra, J. P. Brodie, and S. M. Kent, *Astrophys. J.* **370**, 495 (1991).
41. J. Ma, *Research in Astronomy and Astrophysics* **12**, 115 (2012).
42. Z. Fan, Y.-F. Huang, J.-Z. Li, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics* **11**, 1298 (2011).
43. B. J. Pritzl, K. A. Venn, and M. Irwin, *Astron. J.* **130**, 2140 (2005).
44. J. C. Roediger, S. Courteau, G. Graves, and R. P. Schiavon, *Astrophys. J. Suppl.* **210**, 10 (2014).
45. S. Mészáros, S. L. Martell, M. Shetrone, et al., *Astron. J.* **149**, 153 (2015).
46. A. Sarajedini, L. R. Bedin, B. Chaboyer, et al., *Astron. J.* **133**, 1658 (2007).
47. G. S. Da Costa and T. E. Armandroff, *Astron. J.* **100**, 162 (1990).
48. R. P. Kraft, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 553 (1994).
49. C. Kobayashi and N. Nakasato, *Astrophys. J.* **729**, 16 (2011).
50. C. Kobayashi, H. Umeda, K. Nomoto, et al., *Astrophys. J.* **653**, 1145 (2006).
51. B. H. Andrews, D. H. Weinberg, R. Schönrich, and J. A. Johnson, *Astrophys. J.* **835**, 224 (2017).
52. J. Rybizki, A. Just, and H.-W. Rix, *Astron. and Astrophys.* **605**, A59 (2017).
53. A. Bellini, A. P. Milone, J. Anderson, et al., *Astrophys. J.* **844**, 164 (2017).
54. E. Carretta, R. G. Gratton, A. Bragaglia, et al., *Astron. and Astrophys.* **416**, 925 (2004).
55. K. Brogaard, D. A. Vandenberg, L. R. Bedin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468**, 645 (2017).
56. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 481 (2009).
57. J. E. Colucci, R. A. Bernstein, and A. McWilliam, *Astrophys. J.* **834**, 105 (2017).
58. F. Grundahl, P. B. Stetson, and M. I. Andersen, *Astron. and Astrophys.* **395**, 481 (2002).
59. A. Di Cecco, R. Becucci, G. Bono, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122**, 991 (2010).
60. S. V. Ramirez and J. G. Cohen, *Astron. J.* **123**, 3277 (2002).
61. T. V. Borkova and V. A. Marsakov, *Astronomy Reports* **44**, 665 (2000).
62. L. Lovisi, A. Mucciarelli, F. R. Ferraro, et al., *Astrophys. J.* **719**, L121 (2010).
63. C. Lardo, M. Salaris, A. Savino, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **466**, 3507 (2017).
64. A. A. R. Valcarce, M. Catelan, J. Alonso-García, et al., *Astrophys. J.* **782**, 85 (2014).
65. D. Yong, A. I. Karakas, D. L. Lambert, et al., *Astrophys. J.* **689**, 1031 (2008).
66. P. Gruyters, L. Casagrande, A. P. Milone, et al., *Astron. and Astrophys.* **603**, A37 (2017).
67. E. M. O'Malley, C. Gilligan, and B. Chaboyer, *Astrophys. J.* **838**, 162 (2017).

68. M. Monelli, V. Testa, G. Bono, et al., *Astrophys. J.* **812**, 25 (2015).
69. A. P. Milone, L. R. Bedin, G. Piotto, et al., *Astrophys. J.* **673**, 241 (2008).
70. H. Baumgardt, J. Makino, P. Hut, et al., *Astrophys. J.* **589**, L25 (2003).
71. F. D'Antona, V. Caloi, J. Montalbán, et al., *Astron. and Astrophys.* **395**, 69 (2002).
72. M. Sharina and V. Shimansky, *IAU Symposium* **316**, 347 (2017).
73. S. Galleti, L. Federici, M. Bellazzini, et al., *Astron. and Astrophys.* **416**, 917 (2004).
74. S. Galleti, L. Federici, M. Bellazzini, et al., *VizieR Online Data Catalog* **5143** (2014).
75. A. P. Huxor, A. D. Mackey, A. M. N. Ferguson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **442**, 2165 (2014).
76. R. P. Schiavon, N. Caldwell, H. Morrison, et al., *Astron. J.* **143**, 14 (2012).
77. R. P. Schiavon, N. Caldwell, C. Conroy, et al., *Astrophys. J.* **776**, L7 (2013).
78. J. E. Colucci, R. A. Bernstein, S. Cameron, et al., *Astrophys. J.* **704**, 385 (2009).

Age, Helium Content and Chemical Composition of Globular Clusters in the M31 Neighborhood and in our Galaxy

M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and D. A. Khamidullina

Long-slit medium-resolution integrated spectra of four globular clusters in the vicinity of the Andromeda galaxy ([SD2009] GC7, Mayall II, Mackey-GC1 and Bol 298), acquired with the SCORPIO-I spectrograph at the 6-m telescope BTA, and spectra of several Galactic globular clusters (NGC 104, NGC 6121 (M4), NGC 7078 (M15) from the library of Schiavon and NGC 6341 (M92), NGC 6838 (M71), NGC 7078, observed with the CARELEC 1.93m telescope OHP) were used for derivation of age, Helium content (Y), metallicity ($[Fe/H]$), and the content of several chemical elements (C, N, O, Mg, Ca, Ti, Cr, Ni, Sr and Ba). Selection of theoretical isochrones for determination of masses, T_{eff} and $\lg g$ of stars in the clusters was carried by finding a correspondence between the observed and theoretical line profiles. Spectral blends with the lines predominantly belonging to a certain chemical element were used to estimate the abundances of metals. The shape and intensity of hydrogen lines were analyzed to estimate the age and helium content.

Keywords: *globular clusters: general — globular clusters: individual: MayallIII, Mackey-GC 1, Bol 298, [SD2009] GC7, NGC104, NGC6121, NGC6838, NGC7078 — galaxies: individual: M31: chemical composition — galaxies*