

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи  
УДК 524.47, 524.7

Маричева Маргарита Игоревна

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ СУММАРНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ НАШЕЙ И  
ДРУГИХ ГАЛАКТИК**

Специальность 1.3.1 —  
«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н.  
Шарина Маргарита Евгеньевна

Нижний Архыз — 2024

## Оглавление

|   | Стр.      |
|---|-----------|
| <b>Введение</b> . . . . .   | <b>4</b>  |
| <b>Глава 1. Методы анализа спектров суммарного излучения шаровых скоплений</b> . . . . .  | <b>14</b> |
| 1.1 Метод определения возраста, удельного содержания гелия и химического состава шаровых скоплений . . . . .                                      | 14        |
| 1.1.1 Выбор изохроны для расчета синтетических спектров суммарного излучения . . . . .  | 16        |
| 1.1.2 Описание программы подбора теоретической изохроны для оптимального описания наблюдаемого спектра суммарного излучения . . . . .             | 17        |
| 1.2 Ликская система абсорбционных индексов . . . . .  | 20        |
| <b>Глава 2. Анализ спектров очень бедных металлами шаровых скоплений M31</b> . . . . .  | <b>22</b> |
| 2.1 Постановка задачи . . . . .   | 22        |
| 2.2 Наблюдательные данные и анализ полученных спектров . . . . .  | 23        |
| 2.3 О влиянии звезд горизонтальной ветви на интенсивность бальмеровских линий в спектрах суммарного излучения . . . . .                           | 28        |
| 2.4 Сравнение изохрон, подобранных при моделировании спектров суммарного излучения, с наблюдаемыми диаграммами «цвет-звездная величина» . . . . . | 33        |
| 2.4.1 H $\beta$ и B317 . . . . .  | 33        |
| 2.4.2 EHT8 . . . . .  | 35        |
| 2.5 Химический состав шаровых скоплений . . . . .   | 36        |
| 2.6 Заключение к главе 2 . . . . .  | 39        |
| <b>Глава 3. Исследование спектров четырех шаровых скоплений M31 в проекционной близости к NGC205</b> . . . . .                                    | <b>42</b> |
| 3.1 Постановка задачи . . . . .   | 42        |
| 3.2 Наблюдательные данные и анализ полученных спектров . . . . .  | 43        |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 3.3   | Диаграммы «цвет-звездная величина» для скоплений по литературным данным . . . . .                                   | 49        |
| 3.3.1   | Определение расстояния до скоплений по светимости вершины ветви красных гигантов . . . . .                          | 50        |
| 3.4   | Сравнение результатов анализа спектров с литературными данными для шаровых скоплений М31 и звезд поля Галактики . . | 52        |
| 3.5   | Заключение к главе 3 . . . . .  | 57        |
| <b>Глава 4. Свойства звездных населений восьми шаровых скоплений Галактики низкой поверхностной яркости . .</b> |   | <b>59</b> |
| 4.1   | Постановка задачи . . . . .   | 59        |
| 4.2   | Наблюдательные данные и анализ полученных спектров . . . . .  | 61        |
| 4.3   | Результаты определения возраста, $[Fe/H]$ и $[\alpha/Fe]$ и сравнение с литературными данными . . . . .             | 64        |
| 4.3.1   | Моделирование спектра NGC6535 . . . . .   | 70        |
| 4.4   | Диаграммы «цвет - звездная величина» для Pal10 и NGC6426 . .  | 71        |
| 4.5   | Обсуждение результатов . . . . .  | 75        |
| 4.6   | Заключение к главе 4 . . . . .  | 79        |
| <b>Заключение . . . . .</b>   |   | <b>81</b> |
| <b>Список литературы . . . . .</b>  |   | <b>85</b> |

## Введение

Большая часть звезд в нашей Галактике сформировалась в скоплениях [1]. Звездные скопления являются свидетелями эпизодов наиболее интенсивного звездообразования в галактиках (см., например, [2]). Изучение свойств, происхождения и путей эволюции звездных скоплений важно для решения фундаментальных задач астрофизики. В современных теориях галактики состоят из комбинации звезд, которые образовались «in situ» внутри основного гало галактики, и компонента «ex situ», который был создан в результате последовательности слияний и событий аккреции [3–5]. Доказательством такого сценария может служить идентификация разрушенных галактик-спутников Млечного Пути, таких как Стрелец, Гайя-Энцелад и другие, посредством анализа их кинематики и химического состава звезд и шаровых скоплений ([6; 7]). Большое количество субструктур в гало М31 также свидетельствует об активной истории аккреции [8; 9]. Поэтому продолжается активное изучение свойств звездных населений шаровых скоплений, а также процессов формирования и химической эволюции звезд в них, что важно как для понимания процессов нуклеосинтеза и звездной эволюции в ранней Вселенной (см., например, [10; 11], так и для понимания того, как возникли и сформировались основные структурные компоненты нашей и других спиральных галактик: диск, гало, балдж.

Большинство шаровых скоплений – это компактные, яркие и старые объекты. Их эффективный радиус достигает нескольких десятков пк с более типичными значениями около 3-5 пк. Средняя абсолютная звездная величина шаровых скоплений –  $M_V \sim -7$ , а возраст – порядка и более 10 млрд лет. В пределах Млечного Пути шаровые скопления концентрируются в гало, толстом диске и балдже и отсутствуют в тонком диске. В среднем шаровые скопления на два порядка массивнее рассеянных и намного беднее металлами. Типичная металличность шаровых скоплений составляет 1-3% от солнечной.

Однако при более внимательном рассмотрении классическое определение шаровых скоплений оказывается расплывчатым и существует много объектов, которые классифицируются как шаровые скопления на основе лишь нескольких из этих критериев. Caretta et al. 2010 [12] предложили новое определение: в отличие от рассеянного, в шаровом скоплении должны наблюдаться так назы-

ваемые множественные звездные населения, находящиеся на одной стадии эволюции, но имеющие разные содержания легких химических элементов. Согласно исследованиям шаровых скоплений Галактики большинство из них имеет две звездные популяции, отличающиеся содержаниями легких элементов (He, C, N, O, Na и Al): первую – с содержаниями как у большинства звезд поля Галактики при данной металличности и вторую – с содержаниями элементов, измененными в высокотемпературных процессах горения водорода: CNO-цикле и NeNa-цикле и MgAl-цикле (например, [13]). Поскольку последние процессы не могут протекать в маломассивных звездах, а разброс в содержаниях наблюдается даже у звезд точки поворота Главной последовательности, предполагают, например, что звезды в шаровых скоплениях произошли из газа, обогащенного массивными звездами первого поколения. У так называемых аномальных шаровых скоплений в дополнение к разбросу в содержаниях легких элементов имеется разброс по содержанию Fe и элементам s-процесса. Аномальные шаровые скопления относятся к самым массивным скоплениям в Галактике и, как предполагают, являются ядрами разрушенных карликовых галактик. Чем массивнее скопление, тем сложнее и многообразнее проявления множественности населения [14].

Проблема второго параметра морфологии горизонтальной ветви связана с явлением множественных звездных населения в шаровых скоплениях [14]. Шаровые скопления одного возраста и металличности имеют разную морфологию горизонтальной ветви. Распределение по цвету (то есть по  $T_{eff}$ ) и светимости таких звезд изменяется с возрастом, металличностью, удельным содержанием гелия Y и эффективностью потери массы красными гигантами ([15–17]). Звезды первой популяции располагаются на красном конце горизонтальной ветви и имеют Y ниже, чем у звезд второй популяции, обогащенных гелием и более горячих. Разброс по Y у звезд горизонтальной ветви шарового скопления  $\Delta Y$  коррелирует с массой скопления, а также разбросом по содержанию элементов у звезд скопления [18]. Чем выше  $\Delta Y$ , тем выше содержание N, Na, и Al и ниже C, O, и Mg наблюдается у обогащенных звездных популяций [18]. Значительные вариации содержания Mg наблюдаются у небольшого числа скоплений, и более значительны у низкометаллических объектов [14].

Из представленного в данном исследовании анализа спектров низкого разрешения можно судить о возможном присутствии множественных звездных на-

селений в исследуемых скоплениях по полученному содержанию легких элементов и по протяженности горизонтальной ветви в голубую сторону. Скопления с пониженными  $[Mg/Fe] \leq 0$  и голубой горячей горизонтальной ветвью (высокое  $Y$  и высокая  $T_{eff}$  у звезд голубого конца горизонтальной ветви) с большой степенью вероятности имеют множественные населения, о чем свидетельствуют исследования шаровых скоплений Галактики.

Результаты построения модельных спектров суммарного излучения шаровых скоплений с использованием синтетических или наблюдаемых спектров звезд и результаты анализа распределения звезд на диаграмме «цвет-звездная величина» зависят от используемых моделей звездной эволюции. Однако в моделях звездной эволюции не учитывается разнообразие условий конвективного перемешивания в звездах в зависимости от их химического состава, массы и эволюционной стадии ([17; 19] и ссылки в них). Возможной причиной несоответствия изохроны звездной эволюции наблюдаемым свойствам звездных населений шаровых скоплений может быть также вклад фоновых звезд в спектры и результаты звездной фотометрии скоплений.

Анализ спектров суммарного излучения шаровых скоплений является одним из наиболее эффективных инструментов определения их возраста и химического состава, а также изучения эволюции родительских галактик (см. например, [20—24] и ссылки в этих статьях). Одним из таких методов в литературе является метод попиксельного описания спектров суммарного излучения скопления моделями простых звездных населений (например, ULYSS [25; 26]), рассчитанных с использованием эмпирических звездных библиотек (например, модели Vazdekis et al. 2010 [27] с эмпирической звездной библиотекой Miles). Главным недостатком эмпирических звездных библиотек (и моделей звездного населения, основанных на них) является то, что содержание элементов наиболее полно представлено для звезд солнечного окружения с малой массой. Вычисление синтетических спектров скоплений с использованием моделей звездных атмосфер, примененное в данном исследовании, не ограничено параметрами атмосферы, диапазоном длин волн, спектральным разрешением или диапазоном вариаций содержания элементов ([28] и ссылки в ней).

Актуальность выполненного исследования заключается в том, что в работе предложены новые идеи и подходы для определения возраста и химического состава шаровых скоплений. Полученные результаты способствуют решению

многих широко обсуждаемых в литературе проблем, таких как проблема разделения влияния возраста и металличности на наблюдаемые характеристики скоплений, проблема влияния свойств звезд горизонтальной ветви на результаты оценки возраста скоплений и звездных комплексов.

**Целью** исследования является детальное изучение свойств звездных населений шаровых скоплений нашей и других галактик. Предполагается исследовать спектры суммарного излучения скоплений с помощью разработанной специальной методики на предмет измерения их фундаментальных параметров: химического состава, возраста и удельного содержания гелия.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Определение и сравнительный анализ следующих фундаментальных параметров Галактических и внегалактических шаровых скоплений: химический состав, возраст и удельное содержание гелия  $Y$ .
2. Сравнение подобранных по спектрам суммарного излучения изохрон звездной эволюции с наблюдаемыми диаграммами «цвет-звездная величина» скоплений, если имеются данные глубокой звездной фотометрии.
3. Сравнение полученных возраста,  $Y$  и химического состава исследуемых скоплений с таковыми у детально изученных в литературе звезд и шаровых скоплений разных подсистем нашей Галактики.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Впервые показано, что существует немонотонная зависимость ширины на половине интенсивности и глубины бальмеровских линий от возраста, металличности и удельного содержания гелия при расчете синтетических спектров суммарного излучения скоплений с учетом стадии горизонтальной ветви. Выяснено, что данная зависимость обусловлена изменениями температуры и светимости звезд горизонтальной ветви и их вклада в суммарный спектр в моделях звездной эволюции.
2. Показано, что оптимальное определение параметров изохрон звездной эволюции для расчета синтетических спектров скоплений позволяет достичь не только согласия между модельным и наблюдаемым спектрами, но и соответствия выбранных изохрон результатам звездной фотометрии для исследуемых объектов.

3. Определено содержание химических элементов Fe, C, Mg, Ca, Mn, Ti и Sr для восьми внегалактических шаровых скоплений очень низкой металличности  $[Fe/H] < -2$  dex, четырех шаровых скоплений M31 промежуточной металличности  $-1.1 < [Fe/H] < -0.75$  dex и скопления Галактики с низкой поверхностной яркостью NGC6535 по спектрам их суммарного излучения. Для всех объектов впервые определены удельное содержание гелия и возраст, согласно выбранным для моделирования спектров скоплений изохронам. Для пяти объектов выборки получено низкое содержание магния  $[Mg/Fe] < 0$  dex по сравнению с содержанием для звезд поля Галактики  $[Mg/Fe] \sim 0.4$  dex, что свидетельствует о присутствии в скоплениях множественных звездных населений. Показано удовлетворительное согласие содержания остальных элементов с литературными данными для звезд поля Галактики.
4. Для восьми шаровых скоплений Галактики с низкой поверхностной яркостью впервые определены значения абсорбционных индексов в Ликской системе по спектрам их суммарного излучения. Для семи из них найдены яркие скопления – аналоги нашей Галактики со сходными значениями индексов. Для всех восьми объектов определены возраст, металличность и содержание элементов  $\alpha$ -процесса путем сравнения измеренных Ликских индексов с литературными модельными значениями.

**Научная новизна:**

1. Выполнен анализ наблюдательных данных, результаты для которых ранее не публиковались: (i) Выполнена обработка и анализ спектров внегалактических шаровых скоплений, полученных в результате наблюдений по программе Шариной М. Е. на телескопе БТА. (ii) Выполнен анализ спектров суммарного излучения шаровых скоплений Галактики, полученных Шариной М. Е. на 1.93-м телескопе обсерватории Верхнего Прованса (ОНР). (iii) Выполнена обработка архивных прямых снимков, полученных на VLT.
2. Для всех внегалактических шаровых скоплений выборки впервые представлены параметры звезд горизонтальной ветви, заданные выбранными для анализа спектров изохронами.



3. Для скоплений Vol20, Vol50 (в M31) и скопления [CS82]C39 (в M33) впервые получены оценки возрастов из анализа спектров их суммарного излучения методом, описанным в главе 1.
4. Для восьми внегалактических скоплений с очень низкой металличностью, а также скоплений Vol20 и Vol50 из выборки скоплений M31 промежуточной металличности впервые получено содержание [C/Fe]. Для скоплений Vol2, Vol20, Vol50, Vol165, Vol317 (в M31) и [CS82]C39 (в M33) впервые получено содержание химических элементов Mg, Ca, Ti, Cr, Mn. Для скоплений Vol6, Vol45 (в M31) впервые определено содержание [Mn/Fe], [Cr/Fe].
5. Для выборки скоплений Галактики низкой поверхностной яркости впервые представлен анализ спектров их суммарного излучения, определены значения абсорбционных индексов, оценки возрастов и средние значения содержания элементов  $\alpha$ -процесса [ $\alpha$ /Fe].

#### **Научная и практическая значимость:**

Основные результаты, представленные в данном исследовании, вносят вклад в исследование фундаментальных параметров внегалактических шаровых скоплений, в том числе наиболее низкометаллических шаровых скоплений, которые чрезвычайно редки. Исследован спектр суммарного излучения единственного известного скопления с  $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.8$  dex, EXT8 в гало M31. Полученные в данной работе изохронные значения возраста и  $Y$ , а также химический состав скоплений могут быть использованы исследователями в процессе изучения нуклеосинтеза и эволюции галактик и их подсистем.

Разработанный алгоритм оптимального подбора изохрон для расчета синтетических спектров скоплений, выполняющий минимизацию отклонений между наблюдаемым и модельным спектрами, может быть использован исследователями для анализа абсорбционных спектров суммарного излучения скоплений и звездных комплексов.

Впервые оцифрованы зависимости между шириной на половине интенсивности и глубиной бальмеровских линий от возраста и металличности  $Z$  в синтетических спектрах суммарного излучения шаровых скоплений с использованием изохрон звездной эволюции. Данные зависимости помогают в оценке вклада звезд горизонтальной ветви в спектр суммарного излучения скоплений и правильной оценке их возраста.

Выполнено определение Ликских индексов, возраста и металличности шаровых скоплений Галактики низкой поверхностной яркости, изучение которых осложнено удаленностью этих объектов или ослаблением света пылью вблизи плоскости Галактики. Результаты могут быть использованы для изучения свойств их звездных населений, а также возможной принадлежности этих объектов звездным потокам.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. Семинар САО РАН (10.12.20, САО РАН). Устный доклад: «Свойства звездных населений восьми галактических шаровых скоплений с низкой центральной поверхностной яркостью» (Маричева М. И.).
2. Конференция «ВАК-2021» (23-28.08.21, Москва). Постерный доклад: «Исследование интегральных спектров четырех шаровых скоплений М31» (Маричева М. И.).
3. «Конкурс-конференция работ сотрудников САО-2022» (08.02.22, САО РАН). Устный доклад: «Исследование интегральных спектров четырех шаровых скоплений М31» (Маричева М. И.).
4. Конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения - 2022» (23-27.07.22, САО РАН). Постерный доклад: «Глубина и ширина Бальмеровских линий в спектрах суммарного излучения шаровых скоплений» (Маричева М. И. и Шарина М. Е.).
5. Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2022 (НЕА-2022)» (19-22.12.22, ИКИ РАН). Постерный доклад: «Исследование семи низкометаллических шаровых скопления в окрестностях М31» (Маричева М. И., Шарина М. Е., Шиманский В. В.).
6. «Конкурс-конференция работ сотрудников САО-2023» (08.02.23, САО РАН). Устный доклад: «Анализ интегральных спектров семи шаровых скоплений в М31» (Маричева М. И.).
7. Конференция «Физика звезд: теория и наблюдения» (26-30.06.23, ГАИШ МГУ). Устный доклад: «Моделирование спектров суммарного излучения внегалактических шаровых скоплений» (Маричева М. И., Шарина М. Е., Шиманский В. В.).

**Личный вклад.** Автор принимал участие в наблюдениях на телескопе БТА по программе М. Е. Шариной «Свойства звездных населений внегалак-

тических шаровых скоплений». Автором выполнялась редукция полученных длиннощелевых спектров суммарного излучения шаровых скоплений. Автором определялись возраст, удельное содержание гелия  $Y$  и химический состав по методике из [24; 28] для всех объектов данного исследования. Для скоплений Галактики рассчитывались значения абсорбционных индексов в Ликской системе и проводилось сравнение полученных значений с модельными. Также автором выполнено исследование влияния вклада звезд горизонтальной ветви в суммарный спектр шарового скопления. Выполнена разработка программы автоматического подбора изохрон звездной эволюции для расчета синтетических спектров.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 публикациях в том числе из списка ВАК:

1. Sharina M. E., Maricheva M. I., Kniazev A. Y., Shimansky V. V., Acharova I. A. Horizontal branch structure, age, and chemical composition for very metal-poor extragalactic globular clusters // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2024 — vol. 528, no. 4 — 7165–7185.
2. Sharina M. E., Maricheva M. I. Properties of Stellar Populations of Eight Galactic Globular Clusters with Low Central Surface Brightness // Astronomy Reports — 2021 — vol. 65, no. 6 — 455–476.
3. Maricheva M. I. Study of Integrated Spectra of Four Globular Clusters in M31 // Astrophysical Bulletin — 2021 — vol. 76, no 4 — 389–404.
4. Sharina M. E., Maricheva M. I. Chemical composition and ages of four globular clusters in M31 from the analysis of their integrated-light spectra // Open Astronomy — 2022 — vol. 31, no. 1 - 118-124.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 101 страницы с 27 рисунками и 18 таблицами. Список литературы содержит 168 наименований.

Во **введении** обсуждается актуальность выбранной темы, определены цели и задачи, сформулированы положения и результаты, выносимые на защиту, обсуждается новизна и научная и практическая значимость данного исследования, указан личный вклад автора. Также приводится список публикаций в которых изложены основные результаты исследования с указанием личного вклада автора.

В **главе 1** приводится описание используемых в работе методов анализа спектров суммарного излучения. В разделе **1.1** описывается метод популяционного синтеза из [24; 28] для определения возраста, удельного содержания гелия и химического состава шаровых скоплений, основанный на сравнении спектров их суммарного излучения с синтетическими спектрами. В разделе **1.1.2** приводится описание программы подбора теоретических изохрон звездной эволюции для оптимального описания наблюдаемого спектра суммарного излучения. В разделе **1.2** обсуждается Ликская система абсорбционных индексов и способ расчета индексов.

В **главе 2** представлены результаты анализа спектров суммарного излучения очень бедных металлами ( $[Fe/H] < -2$  dex) внегалактических шаровых скоплений в галактиках групп М31 и Centaurus A. Основные наблюдательные характеристики скоплений приводятся в таблице 2. В разделе **2.2** описываются наблюдательные данные, полученные с помощью 6-м телескопа САО РАН (БТА), и архивные данные 6,5-м телескопа ММТ. В таблице 5 приводятся параметры изохрон, подобранных для моделирования спектров суммарного излучения скоплений. Полученное содержание химических элементов дано в таблицах 7, 8. В разделе **2.3** описывается исследование влияния звезд стадии горизонтальной ветви на интенсивность бальмеровских линий в синтетических спектрах суммарного излучения скопления. В разделе **2.4** выполнено сравнение изохрон, подобранных при моделировании спектров суммарного излучения, с наблюдаемыми диаграммами «цвет-звездная величина» для скоплений [H76b] 3, Vol317 и EHT8. Также для объектов были определены модули расстояния  $(m-M)_0$  и избытки цвета  $E(B-V)$ , которые даны в таблице 6. В разделе **2.5** показано сравнение химического состава шаровых скоплений с соответствующим содержанием, полученным методом спектроскопии высокого разрешения для звезд поля Галактики ([29–33]) и шаровых скоплений в М31 из работ [20] и [34]. В разделе также обсуждаются возможные причины расхождения полученного в этой работе содержания с литературными.

В **главе 3** представлены результаты анализа спектров суммарного излучения четырех ярких шаровых скоплений промежуточной металличности ( $-1.1 < [Fe/H] < -0.75$  dex) в галактике М31. Основные характеристики исследуемых скоплений приводятся в таблице 9. В разделе **3.2** описываются наблюдения спектров суммарного излучения скоплений исследования, полученные на

6-м телескопе САО РАН (БТА), и их обработка. Также описывается процесс подбора теоретических изохрон Bertelli et al. 2008 [35] и Pietrinferni et al. 2004 [36] для моделирования синтетических спектров. В таблицах 11 и 12 приведено полученное содержание химических элементов. В разделе 3.3 приводится сравнение подобранных для моделирования спектров изохрон с наблюдаемыми диаграммами «цвет-звездная величина» скоплений Vol6 и Vol45. В разделе 3.3.1 описывается процедура определения расстояния до скоплений Vol6 и Vol45 по светимости вершины ветви красных гигантов. В таблице 13 приводятся полученные значения модулей расстояний до скоплений  $(m-M)_0$  и избытки цвета  $E(B-V)$  в сравнении с литературными данными. В разделе 3.4 приводится сравнение результатов анализа спектров с литературными данными для шаровых скоплений M31 ([22] и [34]) и звезд поля Галактики из [30]. Также обсуждаются возможные причины расхождения полученных в этом исследовании содержаний с литературными данными.

В главе 4 представлены результаты анализа спектров суммарного излучения восьми шаровых скоплений Галактики с относительно низкой светимостью и звездной плотностью. Основные наблюдательные данные для исследуемых скоплений и других скоплений нашей Галактики с похожими свойствами приводятся в таблице 15. В разделе 4.2 описываются архивные наблюдательные спектральные данные, полученные на 1.93-м телескопе ОНР. В разделе 4.3 дано сравнение на диагностических диаграммах значений абсорбционных Ликских индексов, полученных для объектов исследования, с соответствующими модельными индексами из [37; 38]. В таблицах 17, 18 приводятся полученные возраст и металличность в сравнении с соответствующими литературными данными. Описаны результаты подбора химического состава для скопления NGC6535 с использованием метода, описанного в разделе 4.3.1. В разделе 4.4 представлены результаты звездной фотометрии скопления Pal10 с использованием прямых снимков из архива VLT. Здесь же приводится анализ диаграмм «цвет-звездная величина» Pal10 и NGC6426, построенных по данным Gaia DR3, и полученные значения расстояний и избытков цвета. В разделе 4.5 дано обсуждение результатов для каждого исследуемого скопления в отдельности.

В заключении обобщаются основные результаты описанного здесь исследования.

## Глава 1. Методы анализа спектров суммарного излучения шаровых скоплений

### 1.1 Метод определения возраста, удельного содержания гелия и химического состава шаровых скоплений

Метод определения возраста, удельного содержания гелия  $Y$  и химического состава шаровых скоплений основан на сравнении спектров их суммарного излучения с синтетическими спектрами, полученными методом популяционного синтеза. Метод применялся и был подробно описан в работах Sharina et al. 2020, 2024 [24; 28]. Процедура анализа спектров суммарного излучения шаровых скоплений следующая. Возраст и удельное содержание гелия  $Y$  в рамках метода определяются параметрами выбранной для расчета синтетического спектра изохроной звездной эволюции. Процедура подбора изохроны описана в разделе 1.1.2. Содержание химических элементов определяется путем их варьирования до достижения наилучшего согласия между наблюдаемыми и модельными профилями спектральных особенностей, связанных с тем или иным элементом. Фактически химический состав шарового скопления сравнивается с солнечным. Многие спектральные особенности сливаются при разрешении  $\text{FWHM} \sim 5 \text{ \AA}$ . Железо дает большое количество спектральных линий, что позволяет определить его содержание с высокой точностью. Глубины линий железа в синтетических и наблюдаемых спектрах шаровых скоплений зависят от  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и скорости микротурбуленции ( $\xi_{turb}$ ). Последний параметр, в свою очередь, зависит от металличности,  $\log(g)$  и  $T_{eff}$  звезд в скоплении ([39] и ссылки в нем). Интенсивность различных линий железа зависит от  $\xi_{turb}$  в разной степени. В статье Sharina et al. (2020) [24] выведена зависимость  $\xi_{turb}$  от параметров атмосфер звезд в широком диапазоне  $T_{eff}$  и  $\log(g)$  с использованием спектроскопических данных для звезд Галактики. Тесты с использованием спектров шаровых скоплений Галактики, описанные в статьях Sharina et al. 2014, 2017, 2020 [24; 40; 41], показали, что эта схема работает достаточно хорошо. Отметим, что при анализе суммарных спектров внегалактических шаровых скоплений в данной работе используется только сравнение наблюдаемых и синтетических спектров. Однако для оценки результатов анализа и совершенствования метода также важно

сравнить выбранные изохроны для конкретных скоплений и результаты глупобочкой звездной фотометрии на диаграммах «цвет-звездная величина» (CMD), если таковые имеются. Далее приводится более подробное описание метода.

Синтетические спектры суммарного излучения рассчитываются с помощью программного пакета CLUSTER [24] в соответствии с выбранным содержанием химических элементов, функцией масс и звездными параметрами  $T_{eff}$  и  $\log(g)$ , которые задаются изохроной звездной эволюции. Для расчета используются плоскопараллельные гидростатические модели звездных атмосфер на основе ATLAS 9 [42], основанных на солнечных содержаниях химических элементов из [43]<sup>1</sup>. Для анализа применяются длины волн линий поглощения химических элементов, наблюдаемые в воздухе<sup>2</sup>. Программа CLUSTER разработана с использованием метода расчета синтетических звездных спектров, описанного в работе Shimansky et al. 2003 [45]. Расчет осуществляется в ходе численного моделирования переноса излучения в звездных атмосферах, полученного интерполяцией до необходимых параметров методом, описанным в работе Suleimanov 1996 [46].

Синтетический спектр суммарного излучения скопления ( $I(\lambda)$ ) вычисляется на основе синтетических спектров звезд ( $S(\lambda, m)$ ) с массой ( $m$ ), определяемой изохронами звездной эволюции, согласно заданной функции масс  $\Phi(m)$ :

$$I(\lambda) = \int_{m_1}^{m_2} S(\lambda, m) \Phi(m) dm. \quad (1.1)$$

Используется функция масс звезд, вычисляемая в работе Chabrier 2005 [47] по формуле 2 и построенная с учетом звездных компаньонов. Эта функция отлично соответствует как теоретическому распределению для звезд малых масс [48], так и наблюдаемой с помощью Hubble Space Telescope (HST) функции масс близких звезд [49]. В диапазоне масс звезд старых шаровых скоплений эта функция очень близка к часто используемым функциям Salpeter 1955 [50] и Кroupa 2001 [51]. Сходство спектров шаровых скоплений, рассчитанных с разными функциями масс было продемонстрировано в работе [52].

<sup>1</sup>Список атомарных и спектральных линий доступны на сайте R. L. Kurucz (<http://kurucz.harvard.edu/linelists.html>).

<sup>2</sup>Стандарт IAU для преобразования длин волн из воздушных в вакуумные приведен в [44].

Таблица 1 — Химический состав Солнца в терминах удельного содержания водорода (X), гелия (Y) и металлов (Z), принятый в анализе с использованием моделей атмосфер ATLAS 9 [42] и в моделях звездной эволюции.

| Источник                      | X     | Y     | Z      | Z/X    |
|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| CLUSTER с ATLAS 9             | 0.710 | 0.270 | 0.016  | 0.0230 |
| Grevesse & Noels (1993) [53]  | 0.716 | 0.266 | 0.018  | 0.0245 |
| Grevesse & Sauval (1998) [43] | 0.735 | 0.248 | 0.017  | 0.0230 |
| Caffau et al. (2011) [54]     | 0.732 | 0.253 | 0.0153 | 0.0209 |

### 1.1.1 Выбор изохроны для расчета синтетических спектров суммарного излучения

В данном исследовании в основном использовались изохроны эволюции звезд Bertelli et al. 2008 [35]<sup>3</sup> (здесь и далее B08), включая фазу горения гелия. Минимальная начальная звездная масса для изохрон B08 составляет  $0.15 M_{\odot}$ . Выбранные изохроны основаны на солнечном содержании химических элементов по данным из Grevesse & Noels 1993 [53] при металличности Солнца  $Z = 0.017$  [43], т. е. близко к солнечному содержанию, на котором основан ATLAS 9.

Помимо изохрон B08 для моделирования спектров скоплений промежуточной металличности Vol6, Vol20, Vol45, Vol50 (см. глава 3, таблица 12) и скопления очень низкой металличности EXT8 (см. главу 2, таблица 5) использовались канонические масштабированные к солнечному содержанию изохроны BASTI из работы Pietrinferni et al. 2004 [36]. В канонических моделях BASTI, основанных на солнечном содержании из работы Grevesse & Noels 1993 [53], Y связан с металличностью следующим образом:  $dY/dZ \sim 1.4$ .

В таблице 1 показаны удельные содержания водорода (X), гелия (Y) и металлов (Z), принятые в анализе, описанном здесь, с использованием моделей атмосфер ATLAS 9 [42] в сравнении с несколькими подборками солнечного химического состава ([53], [43], [54]). Изохроны BASTI [36]<sup>4</sup> основаны на солнечном содержании из [53]. В новых моделях BASTI, описанных в работах Hidalgo et al. 2018 и Pietrinferni et al. 2021 ([55], [56])<sup>5</sup> используется солнечное распределение металлов из работы Caffau et al. 2011 [54]. Из таблицы 1 видно, что солнеч-

<sup>3</sup><http://cdsweb.u-strasbg.fr/cgi-bin/qcat?J/A+A/484/815>

<sup>4</sup><http://albione.oa-teramo.inaf.it>

<sup>5</sup><http://basti-iac.oa-abruzzo.inaf.it/isocs.html>



ное распределение химических элементов, принятое в данной работе, ближе к распределению [53] и [43], чем к распределению [54], используемому в новых изохронах BASTI. В данном исследовании используются только изохроны, основанные на близких друг к другу солнечных содержаниях элементов из статей [53] или [43].

### 1.1.2 Описание программы подбора теоретической изохроны для оптимального описания наблюдаемого спектра суммарного излучения

Выбор изохроны для расчета синтетического спектра суммарного излучения может осуществляться с помощью автоматической процедуры, минимизирующей отклонения между синтетическим спектром и наблюдаемым, нормированным к синтетическому. Программа написана на языке PYTHON v3.8.8<sup>6</sup> с использованием пакетов NUMPY и SCIPY<sup>7</sup>.

Для реализации алгоритма была рассчитана сетка синтетических спектров методом, описанным в разделе 1.1. Разрешение модельных спектров составляет  $\text{FWHM} = 0,00166 \text{ \AA}$ . Модельные спектры сглаживаются до разрешения наблюдаемого спектра (для выборки скоплений, представленной в данном исследовании  $\text{FWHM} = 5.5 \text{ \AA}$ ). Оценки логарифма возраста изохроны B08 [35] для расчета сетки модельных спектров были выбраны следующие: от 9.7 до 10.15 с шагом 0.05. Значения  $Y$  были: 0.23, 0.26 и 0.30.

На первом этапе работы алгоритма из заранее рассчитанных сеточных ищется синтетический спектр с минимальным отклонением от наблюдаемого по параметру:

$$\chi = \sum_{i=0}^N \left( \frac{\text{obj}_i - \text{theor}_i[q_1, q_2, q_3, q_4]}{\text{err}_i} \right)^2,$$

где  $\text{obj}_i$  и  $\text{err}_i$  — элементы наблюдаемого спектра скопления и спектра ошибок (способ расчета спектра ошибок см. в Sharina et al. 2024 [28] приложение A),  $\text{theor}_i$  — синтетический спектр, заданный параметрами изохроны  $q_1$ ,

<sup>6</sup><http://www.python.org/>

<sup>7</sup><https://scipy.org>

$q_2$ ,  $q_3$  и  $q_4$  ( $Y$ , логарифм возраста и металличность изохроны  $Z_{B08}$  и металличность моделей атмосфер  $[Fe/H]_{atm}$ ). Перед вычислением  $\chi$  уровень континуума наблюдаемого спектра нормируется на уровень континуума синтетического. Параметры найденного синтетического спектра используются в качестве начального приближения на следующем этапе программы. На следующем этапе решается нелинейная задача наименьших квадратов с заданными ограничениями параметров. Для этого была использована встроенная функция библиотеки `scipy.optimize.least_squares`<sup>8</sup>, которая находит локальный минимум функции  $F(x)$ :  $F(x) = 0.5 \cdot \sum_{i=0}^{m-1} (\rho(f_i(x)^2))$  при условии  $lb \leq x \leq ub$ , где  $f(x)$  — функция невязки  $f_i(x) = (obj_i - theor_i(x))/err_i$ ,  $i$  — элемент спектра и  $\rho(s)$  — функция потерь. Эта функция использует значение по умолчанию:  $\rho(s) = s = f(x)^2$ , где  $x$  — обязательные параметры:  $Y$ ,  $\log(Age)$ ,  $Z_{B08}$  и  $[Fe/H]_{atm}$ . Минимизация выполняется с использованием алгоритма «trf» (Trust Region Reflective). На каждой итерации алгоритма минимизации модельный спектр ( $theor(x)$ ) рассчитывается как линейная интерполяция сеточных спектров к полученным параметрам  $x$ . Наблюдаемый спектр скопления ( $obj$ ) и спектр ошибок ( $err$ ) нормализуется на интерполированный модельный спектр ( $theor(x)$ ) также на каждой итерации. Программа рассчитывает 95% доверительный интервал для полученных параметров. Процедура нормировки спектров на уровень теоретического континуума следующая. Список длин волн, в которых определяется континуум, был составлен заранее. Интенсивности наблюдаемого спектра в этих точках континуума усреднены в диапазоне  $\pm 1 \text{ \AA}$ . Для определения уровня континуума модельного спектра берется максимальная интенсивность в диапазоне  $\pm 1 \text{ \AA}$ . Полученные точки континуума линейно интерполируются по всей длине наблюдаемого и модельного спектра. В результате наблюдаемый спектр делится на континуум наблюдаемого спектра и умножается на псевдоконтинуум модельного спектра.

На рисунке 1.1 показаны результаты экспериментов Монте-Карло по подбору параметров изохроны для сотни спектров, полученных из одного синтетического, рассчитанного с параметрами изохроны B08 [35]  $Y = 0.26$ ,  $\log(Age) = 10.0$ ,  $Z = 0.0004$  и металличностью моделей атмосфер  $[Fe/H] = -2.0 \text{ dex}$  путем добавления случайного шума. Среднее отношение сигнал/шум в каждом спектре равно 100. В этом случае, когда в качестве исследуемых спектров используются

<sup>8</sup>[https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.least\\_squares.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.least_squares.html)

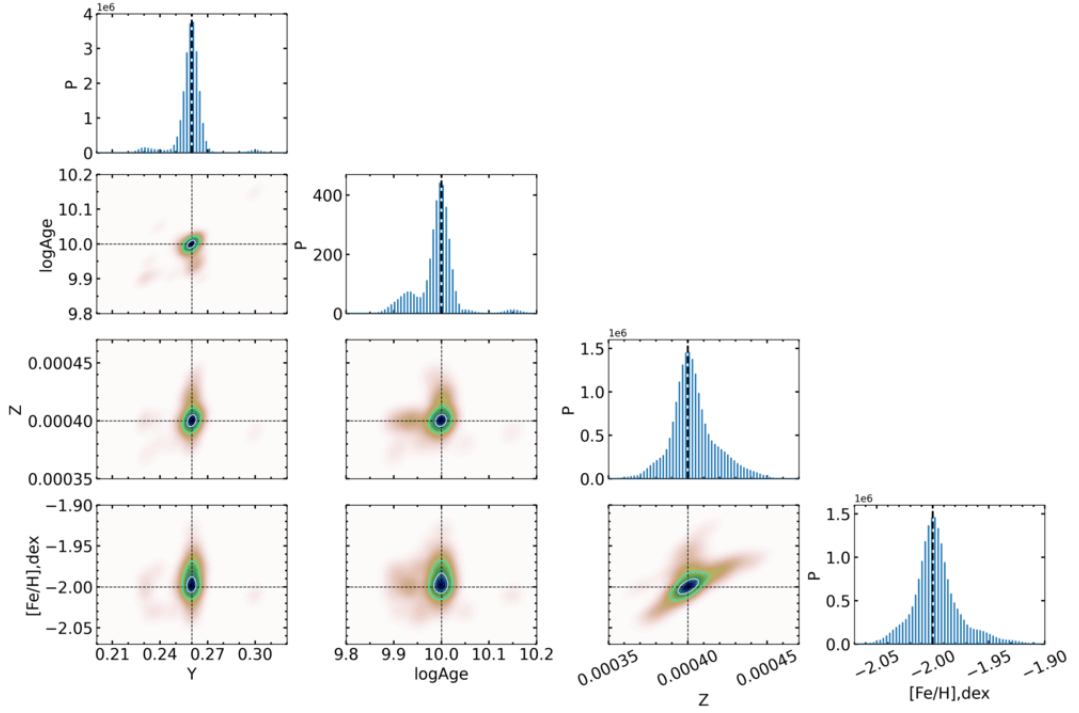


Рисунок 1.1 — Результат симуляций Монте-Карло.

искусственно зашумленные модельные спектры, спектры ошибок представляют собой случайный шум, составляющий в среднем  $1/100$  по отношению к сигналу. Четыре диагональные панели на рисунке 1.1 показывают распределение вероятностей для каждого из параметров:  $Y$ ,  $\log(\text{Age})$ ,  $Z$  и  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . На других панелях рисунка 1.1 показаны совместное распределение вероятностей для этих параметров, рассчитанное с использованием оценок плотности ядра с использованием ядер Гаусса. Контурные линии ошибок  $1\sigma$  и  $2\sigma$  изображены на панелях рисунка 1.1. Определенные дисперсии параметров таковы:  $\sigma = 0.008, 0.034, 1.43\text{E-}5$  и  $0.018$  для  $Y$ ,  $\log(\text{Age})$ ,  $Z$  и  $[\text{Fe}/\text{H}]$  соответственно. Крестиком отмечены параметры изохроны синтетического спектра, использованной в эксперименте. На рисунке 1.1 показана корреляция между параметрами  $Y$  и  $\log(\text{Age})$ , определенными алгоритмом, а также корреляция между металличностью  $Z$ -изохроны и металличностью атмосферных моделей  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . Корреляцию между  $Z$  и  $[\text{Fe}/\text{H}]$  можно объяснить следующим образом. Удельное содержание химических элементов тяжелее гелия,  $Z$ , включает в себя большое количество многих химических элементов, включая Fe и элементы пика железа<sup>9</sup>. Корреляция между  $Y$  и  $\log(\text{Age})$

<sup>9</sup>Содержание железа в солнечных единицах:  $[\text{Fe}/\text{H}] = \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}) - \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\odot}$ , где  $N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}$  - соотношение концентраций железа и водорода по числу атомов или по массе относится к удельному содержанию химических элементов тяжелее гелия,  $Z$ . Очевидно, сумма массовых долей водорода, гелия и металлов —  $X+Y+Z = 1$ .

указывает на сложность разделения этих параметров при анализе спектров суммарного излучения. Более подробно этот вопрос обсуждался в разделе 2.3.

## 1.2 Ликская система абсорбционных индексов

Для того чтобы минимизировать эффекты возможных ошибок в абсолютной калибровке потоков и для работы со спектрами различного разрешения, в начале 80-х годов прошлого века (Burstein et al. 1984 [57]) было введено понятие «индекса» – параметризованного представления интенсивности спектральной линии (средни эквивалентной ширине). В результате исследования Worthey et al. 1994 [58] было показано, что, применяя различные пары индексов, стало возможным разделить эффекты возраста и металличности на спектры объектов. В продолжении этой работы (Worthey et al. 1997 [59]) было определено несколько дополнительных индексов и немного подкорректировано определени уже существующих.

Индекс характеризуется полосой пропускания абсорбционной линии и окружен красной и синей полосами для измерения интенсивности континуума. В общей сложности Ликские индексы охватывают 6 молекулярных полос (CN 4150Å, G-полоса, MgH, MgH + Mgb и две полосы TiO) и 18 бленд абсорбционных атомарных линий. С таблицей, в которой представлены все 25 индексов, включенные в систему, и их полосы пропускания, можно ознакомиться на сайте G. Worthey<sup>10</sup>.

Индексы определяются следующим образом. Индексы молекулярных полос (Mag) выражены в величинах, а индексы атомарных линий (EW) – в ангстремах (Å) (см. также описание системы Ликских индексов G. Worthey<sup>11</sup>).

$$EW = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left( 1 - \frac{F_{I\lambda}}{F_{C\lambda}} \right) d\lambda,$$

<sup>10</sup><http://astro.wsu.edu/worthey/html/index.table.html>

<sup>11</sup><http://astro.wsu.edu/worthey/html/system.html>

где  $F_{C\lambda}$  – поток в континууме, определяемый как разница потоков середины красного и синего континуумов,  $F_{I\lambda}$  – поток в линии.

$$Mag = -2.5 \log \left[ \left( \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{F_{I\lambda}}{F_{C\lambda}} d\lambda \right]$$

Для приведения результатов измерения абсорбционных индексов в стандартную систему наблюдают объекты из списка стандартных звезд<sup>12</sup>, наблюдения которых проводились на том же инструменте в те же ночи, и строят зависимость между измеренными по результатам наблюдений и стандартными индексами [58; 59].

Полученные абсорбционные индексы для скоплений в стандартной системе сравниваются с соответствующими индексами, известными для ярких шаровых скоплений Галактики [60], а также с модельными индексами. В данном исследовании используются модели простых звездных населений из работ Thomas et al. 2003, 2004 [37; 38]. Строятся так называемые диагностические диаграммы Ликских индексов (см. например, [61]), на которых видны модельные индексы, соответствующие определенным  $[\alpha/\text{Fe}]$ , возрасту и металличности. На эти данные накладываются определенные в работе абсорбционные индексы скоплений в Ликской системе. Диагностические диаграммы позволяют разделить эффекты возраста и металличности на спектры скоплений, так как индексы, центрированные на водородные линии, чувствительны к возрасту, а значения индексов, диапазоны измерения длин волн которых центрированы на линии металлов или молекулы, определяются интенсивностью этих спектральных особенностей.

---

<sup>12</sup><http://astro.wsu.edu/worthey/html/stars.lis.bin>

## Глава 2. Анализ спектров очень бедных металлами шаровых скоплений М31

### 2.1 Постановка задачи

Определение возраста старых шаровых скоплений по спектрам суммарного излучения связано с проблемой учета излучения звезд горизонтальной ветви (ГВ), соответствующего эволюционной фазе горения гелия в ядре. Если не включать в анализ спектра звезды ГВ, то неопределенность оценки возраста старых шаровых скоплений значительно возрастает, поскольку вклад в спектр звезд с более высоким удельным содержанием гелия  $Y$ , заселяющих более голубые части ГВ, имитирует более молодой возраст ([25; 62–64]). Для учета излучения звезд ГВ, например, были изучены индексы линий поглощения водородной серии Бальмера (см., например, [64–66]), к стандартным изохронам был добавлен вклад потока горячих звезд ГВ [25; 63]. В данном исследовании для этой задачи используются изохроны звездной эволюции.

В данной главе представлено исследование влияния вклада звезд ГВ на профили бальмеровских линий водорода в синтетических спектрах суммарного излучения и результаты анализа спектров суммарного излучения низкого разрешения семи шаровых скоплений в галактиках группы М31 (описание галактик дано в статьях [67–70]) и скопления в сфероидальной карликовой галактике КК197 [71; 72]. Эта карликовая галактика КК197 содержит только старое звездное население (Fahrion et al. 2020 [73]) и находится на расстоянии  $\sim 60$  кпк от центра NGC5128, согласно Karachentsev et al. 2007 [74], в группе Centaurus A. Объектами исследования являются очень низкометаллические ( $[Fe/H] \leq -2$  dex) шаровые скопления, число которых очень мало в нашей и других галактиках [20; 75; 76]. Такие скопления в нашей Галактике имеют преимущественно голубые ГВ. При моделировании бальмеровских линий, а также линий металлов в наблюдаемых спектрах, определены оптимальные параметры изохрон звездной эволюции и, следовательно, параметры атмосфер звезд скопления. Полное обсуждение результатов было представлено в работе [28].

Таблица 2 — Литературные характеристики выборки восьми низкометаллических шаровых скоплений в М31: (1, 2, 3) название скопления, его обозначение и название родительской галактики; (4) прямое восхождение и склонение объекта для эпохи J2000.0; (5, 6) абсолютная величина и лучевая скорость (отмеченные верхним индексом 0 данные полученные в этом исследовании).

| Объект                 | Символ | Галактика | $\alpha$ (J2000.0)<br>$\delta$ (J2000.0) | $M_V$                | $cz$<br>(км·с <sup>-1</sup> )                  |
|------------------------|--------|-----------|--|----------------------|--|
| [VFH2013]<br>РА-N147-1 | РА     | NGC147    | 00:32:35.30<br>+48:19:48.00              | -7.8 <sup>V13</sup>  | -217±8 <sup>0</sup><br>-215±10 <sup>V13</sup>  |
| [H76b]3<br>Hodge III   | НIII   | NGC147    | 00:33:15.20<br>+48:27:23.10              | -8.2 <sup>V13</sup>  | -219±12 <sup>0</sup><br>-197 <sup>L22</sup>    |
| [CS82]C39              | C39    | M33       | 01:34:49.62<br>+30:21:55.50              | -8.6 <sup>Ma13</sup> | -221±10 <sup>0</sup>                           |
| [H32]VIII<br>Bol 317   | B317   | NGC205    | 00:39:55.28<br>+41:47:46.10              | -8.0 <sup>G04</sup>  | -176±8 <sup>0</sup><br>-178±28 <sup>C11</sup>  |
| Bol2                   | B2     | M31       | 00:40:02.60<br>+41:11:53.50              | -7.4 <sup>G04</sup>  | -332±11 <sup>0</sup><br>-338±14 <sup>C11</sup> |
| [H32]74<br>Bol165      | B165   | M31       | 00:43:18.20<br>+41:10:54.70              | -8.1 <sup>G04</sup>  | -67±7 <sup>0</sup><br>-68±14 <sup>C11</sup>    |
| EXT 8                  | EXT8   | M31       | 00:53:14.53<br>+41:33:24.50              | -9.3 <sup>H14</sup>  | -201±13 <sup>0</sup><br>-204 <sup>L20</sup>    |
| [GRH2009]<br>KK197-2   | KK     | NGC5128   | 13:22:02.00<br>-42:32:08.10              | -9.8 <sup>G09</sup>  | 636±4 <sup>0</sup><br>635±2 <sup>F20</sup>     |

Во вторых строках столбцов (5, 6) приведены литературные данные по каждому объекту из статей L22 [20], L20 [70], C11 [77], G09 [71], F20 [73], H14 [78], V13 [69], Ma13 [68].

В таблице 2 приводятся основные литературные характеристики скоплений выборки (колонки 4-6). Во втором столбце таблицы 2 даны символические обозначения названий объектов, используемые на протяжении всей работы. Спектры суммарного излучения и их анализ будут охарактеризованы в разделе 2.2.

## 2.2 Наблюдательные данные и анализ полученных спектров

Для пяти объектов выборки низкометаллических скоплений (EXT8, B317, C39, НIII и РА см. табл. 2) наблюдения спектров суммарного наблюдения выполнялись на телескопе БТА в 2020-2023 гг. с использованием фокального реду-

тора SCORPIO-I [79] в режиме длиннощелевой спектроскопии. Редуктор, оснащенный решеткой VPHG1200B, обеспечивает спектральный диапазон 3600-5400 Å и спектральное разрешение FWHM  $\sim 5.5$  Å при ширине щели 1 угл.сек.

Спектр суммарного излучения скопления КК был получен Князевым А. Ю. на Большом южноафриканском телескопе (SALT) в 2019-2020 гг. Описание наблюдений на SALT и обработки спектров дано в статье Sharina et al. 2024 [28]. Спектры, полученные на SALT, охватывают спектральный диапазон 3700-6700 Å с дисперсией 0.97 Å на пиксель и спектральным разрешением FWHM = 5 Å.

Журнал наблюдений представлен в таблице 3. В столбцах таблицы для каждого скопления, наблюдавшегося в конкретную дату, указаны: (2) дата наблюдения, (3) время экспозиции, (4) отношение сигнал/шум на пиксель на длине волны 4500 Å, полученное после обработки одномерных спектров и (5) FWHM изображений звезд.

Спектры, полученные на БТА, были обработаны с использованием пакетов программного обеспечения MIDAS [80] и IRAF [81]. Первичная обработка ПЗС-изображений, удаление космических лучей и линеаризация двумерных спектров с использованием последовательно полученных спектров He-Ne-Ar лампы проводились в MIDAS. Построенные для каждого объекта дисперсионные соотношения обеспечивали точность калибровки длины волны около 0.16 Å. Вычитание фона неба выполнялось в IRAF с использованием процедуры *background* фона. Одномерные спектры выделялись в IRAF с использованием процедуры *arsum* с коррекцией кривизны спектра по дисперсии.

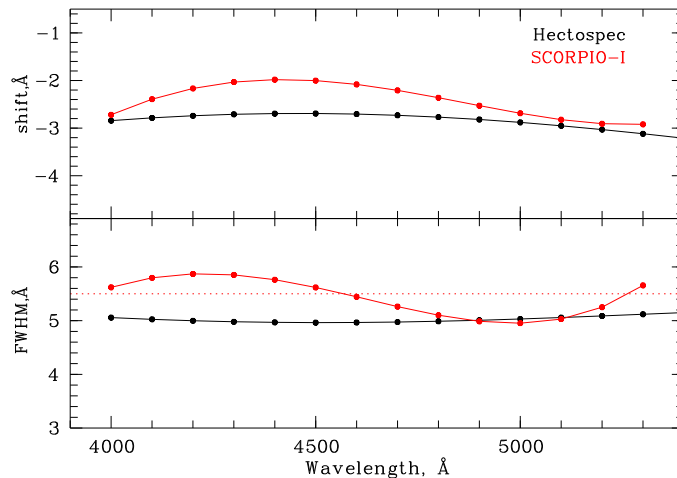


Рисунок 2.1 — Изменение измеренных сдвигов и уширения спектральных линий в сумеречном спектре в зависимости от длины волны в наблюдениях на спектрографах SCORPIO-I и Hectospec.



Таблица 3 — Журнал наблюдений на телескопе БТА и SALT.

| Объект | Дата     | $t_{exp}$<br>(сек.) | SNR<br>(4500Å) | Seeing<br>угл.сек. |
|--------|----------|---------------------|----------------|--------------------|
| БТА:   |          |                     |                |                    |
| EXT8   | 12.11.20 | 3x600               | 110            | 2.0                |
| B317   | 13.11.20 | 4x600               | 79             | 1.0                |
| C39    | 19.09.20 | 3x600               | 64             | 1.8                |
|        | 06.09.21 | 4x1200              | 100            | 3.0                |
| НШ     | 19.09.20 | 4x900               | 58             | 1.8                |
|        | 12.11.20 | 3x600               | 47             | 2.0                |
|        | 04.09.21 | 4x900+<br>+2x600    | 53             | 5.0                |
|        | 06.09.21 | 2x1200+<br>+1x600   | 48             | 3.7                |
| РА     | 19.09.20 | 5x900               | 58             | 1.5                |
|        | 12.11.20 | 3x900               | 51             | 2.0                |
|        | 01.10.22 | 1x900               | 31             | 1.7                |
|        | 23.01.23 | 2x900               | 39             | 1.8                |
| SALT:  |          |                     |                |                    |
| КК     | 03.07.19 | 3x970               | 56             | 1.7                |
|        | 04.08.19 | 3x970               | 54             | 1.7                |
|        | 19.05.20 | 2x1000              | 43             | 1.9                |
|        | 14.06.20 | 2x1000              | 45             | 1.9                |

Таблица 4 — Уточнение использованных в работе архивных данных наблюдений, полученных с помощью спектрографа Nectospec [82] телескопа MMT.

| Object | Data     | $t_{exp}$<br>(S) | SNR<br>(4500Å) | ID<br>proposal |
|--------|----------|------------------|----------------|----------------|
| B317   | 21.10.07 | 4800             | 46             | 2007c-SAO-3    |
|        | 06.07.05 | 3600             | 60             | 2005b-SAO-1    |
| B2     | 23.10.06 | 4800             | 48             | 2006c-SAO-11   |
|        | 17.10.06 | 2400             | 15             | 2006c-SAO-11   |
|        | 20.10.06 | 2400             | 36             | 2006c-SAO-11   |
|        | 27.10.05 | 3600             | 23             | 2005c-SAO-4    |
|        | 21.10.07 | 4800             | 36             | 2007c-SAO-3    |
| B165   | 11.11.04 | 4800             | 80             | 2004c-SAO-9    |
|        | 19.11.06 | 4800             | 85             | 2006c-SAO-11   |
|        | 20.11.07 | 4800             | 65             | 2007c-SAO-3    |

Также использовались спектры, полученные Caldwell et al. 2011 [77] при наблюдениях на спектрографе Hectospec [82] 6.5-м телескопа ММТ. Авторы [77] определили лучевые скорости, возраст и металличность для этих и скоплений в М31 по наблюдениям с Hectospec, измеряя Ликские индексы поглощения и сравнивая их с модельными значениями. Были использованы спектры следующих шаровых скоплений, полученные на ММТ: В317, В2, В165. Обработанные спектры этих объектов взяты из архива спектрографа Hectospec. Спектры были получены с решеткой 270 линий/мм с дисперсией  $1.21 \text{ \AA}$  на пиксель в спектральном диапазоне 3650-9200  $\text{\AA}$ . В столбцах таблицы 4 для каждого скопления, наблюдавшегося в конкретную дату, приведены следующие архивные данные спектрографа Hectospec: (2) дата наблюдений, (3) общее время экспозиции, (4) отношение сигнал/шум на пиксель в приведенном одномерном спектре и (5) идентификатор программы. Одномерные спектры БТА скопления В317 в спектральном диапазоне 3900-5400  $\text{\AA}$  были суммированы с соответствующими спектрами ММТ (табл. 4). Спектральное разрешение спектров ММТ составляет FWHM  $\sim 5 \text{ \AA}$ . Перед суммированием спектры Hectospec были приведены к разрешению SCORPIO-I. Зависимость спектрального разрешения от длины волны и последующее сглаживание спектров до необходимого разрешения определялись на основе исследования функции рассеяния линии (LSF) спектрографа с использованием программного пакета UlySS Лионского университета [25; 26]. На веб-странице UlySS приведены примеры построения LSF<sup>1</sup>. Спектр любого объекта можно представить сверткой спектра, принадлежащего самому объекту, и LSF, описывающей свойства прибора. LSF можно определить по спектрам: (1) сумеречного неба, (2) калибровочной лампы спектрографа или (3) компактного объекта (стандартной звезды, шаровые скопления). При наблюдении протяженных объектов (например, галактик), занимающих большую часть ПЗС-кадра, используется первый или второй способ построения LSF. Поскольку исследуемые шаровые скопления на расстоянии М31 можно рассматривать как компактные объекты, их спектры можно использовать для построения LSF. Эта LSF описывает функцию прибора для данной конкретной части ПЗС-кадра. Примеры построенных LSF для спектров, полученных с помощью спектрографов SCORPIO-I (БТА) и Hectospec (ММТ), показаны на рисунке 2.1.

<sup>1</sup><http://ulyss.univ-lyon1.fr/tutobase.html>

Таблица 5 — Литературные и полученные здесь (отмечены верхним индексом 0) характеристики восьми исследуемых скоплений: (1) обозначение скопления; (2) металличность  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ; (3, 4, 5) возраст изохроны, которая использовалась при моделировании спектра скопления в млрд лет,  $Z$  и  $Y$ .

| Символ | $[\text{Fe}/\text{H}]$<br>(dex)              | Age (млрд лет)                          | Изохрона<br>$Z^0$        | $Y^0$                  |
|--------|--|---|--------------------------|------------------------|
| РА     | $-2.1 \pm 0.16^0$<br>$-2.3 \pm 0.02^{L22}$   | $10.0 \pm 0.28^0$<br>$13^{L22}$         | $0.0001 \pm 0.00001^0$   | $0.26 \pm 0.005$       |
| НШ     | $-2.25 \pm 0.15^0$<br>$-2.36 \pm 0.04^{L22}$ | $12.6 \pm 0.21^0$<br>$13^{L22}$         | $0.0001 \pm 0.00002^0$   | $0.30 \pm 0.005$       |
| С39    | $-2.2 \pm 0.15^0$                            | $12.6 \pm 0.07^0$                       | $0.0001 \pm 0.00001^0$   | $0.30 \pm 0.01$        |
| В317   | $-2.02 \pm 0.16^0$<br>$-2.1 \pm 0.2^{C11}$   | $12.6 \pm 0.15^0$<br>$10.0^{S06}_{CMD}$ | $0.0004 \pm 0.00004^0$   | $0.26 \pm 0.0024$      |
| В2     | $-2.0 \pm 0.14^0$<br>$-2.2 \pm 0.2^{C11}$    | $10.0 \pm 0.23^0$<br>$(14)^{C11}$       | $0.0001 \pm 0.00001^0$   | $0.26 \pm 0.003$       |
| В165   | $-1.9 \pm 0.12^0$<br>$-2.0 \pm 0.2^{C11}$    | $12.6 \pm 0.2^0$<br>$(14)^{C11}$        | $0.0004 \pm 0.00004^0$   | $0.26 \pm 0.005$       |
| EXT 8  | $-2.8 \pm 0.15^0$<br>$-2.81 \pm 0.04^{L22}$  | $11.0 \pm 0.3^0$<br>$13^{L21}$          | $0.00001 \pm 0.000004^0$ | $0.245 \pm 0.005$      |
| КК     | $-2.15 \pm 0.13^0$<br>$-1.84 \pm 0.05^{F20}$ | $13.6 \pm 0.47^0$<br>$6.5^{F20}$        | $0.00013 \pm 0.00003^0$  | $0.26^{+0.04}_{-0.01}$ |

Для всех скоплений, кроме EXT8, изохроны B08 [35]. Для EXT8 лучшей была изохрона BASTI [36]. Во вторых строках столбцов (2, 3) приведены литературные данные по каждому объекту из статей L21[85], L22 [20], C11 [77], F20 [73], S06 [86].

Для измерения лучевых скоростей шаровых скоплений (табл. 2) по их спектрам суммарного излучения использовался пакет программ UlySS с модельными сетками PEGASE-HR [83], функция масс Salpeter 1955 [50] и звездная библиотека ELODIE [84]. Для определения лучевых скоростей использовались инструментальные LSF, построенные с помощью UlySS.

Анализ полученных спектров суммарного излучения шаровых скоплений выполнялся согласно методу популяционного синтеза, описанного в разделе 1.1. В таблице 5 приводятся параметры подобранных для моделирования спектров изохрон B08 [35] и изохрны BASTI [36] в случае скопления EXT8. Изохроны подбирались с помощью автоматической процедуры, описанной в разделе 1.1.2. Для всех изученных скоплений впервые представлены параметры звезд ГВ, заданные выбранными изохронами, соответствующий возраст и содержание углерода. Содержание ряда других элементов (Mg, Ca, Ti, Cr и Mn) для пяти

скоплений определено впервые. Полученное содержание элементов приводится в таблицах 7, 8. Одномерные спектры исследуемых скоплений показаны на рисунке 2.9 (в конце главы) в сравнении с синтетическими. Синтетические спектры рассчитаны с выбранными параметрами изохрон и содержанием элементов, приведенных в таблицах. Нормировка наблюдаемого спектра к уровню континуума синтетического осуществлялась методами, приведенными в разделе 1.1.2.

### 2.3 О влиянии звезд горизонтальной ветви на интенсивность бальмеровских линий в спектрах суммарного излучения

В ряде исследований показано, что определение возраста старых шаровых скоплений по спектрам их суммарного излучения связано с проблемой учета излучения звезд ГВ соответствующей стадии горения гелия в ядре. Если не включать в анализ спектра скопления излучение звезд ГВ, то неопределенность в оценке возраста старых шаровых скоплений сильно возрастает, так как вклад в спектр звезд с более высоким удельным содержанием гелия  $Y$ , населяющих более голубые части ГВ, имитирует более молодой возраст (см. например, [25; 62–64]). Для учета излучения звезд ГВ, например, изучались индексы бальмеровских линий поглощения [64–66], излучение горячих звезд ГВ добавлялось к излучению звезд на стандартных изохронах [25; 63] либо использовались изохроны, включающие стадию ГВ [24].

В этом разделе будет описываться изменение ширины на половине интенсивности (FWHM) и глубины ( $I_{core}$ ) бальмеровских линий в спектрах суммарного излучения шаровых скоплений с очень низкой металличностью ( $Z=0.0001$ ,  $[Fe/H]\sim -2.23$  dex) в зависимости от возраста. Раздельное рассмотрение этих двух параметров, характеризующих линии поглощения, полезно в связи с тем, что звезды на разных стадиях эволюции вносят разный вклад в спектры суммарного излучения, а FWHM и  $I_{core}$  в спектрах звезд зависят от параметров их атмосферы. Например, линии водорода горячих звезд ГВ широкие и глубокие, а линии звезд ветви красных гигантов (ВКГ) узкие и мелкие. FWHM и  $I_{core}$  звезд главной последовательности и ветви субгигантов имеют разные промежуточные значения между значениями для звезд ГВ и ВКГ. В этом раз-

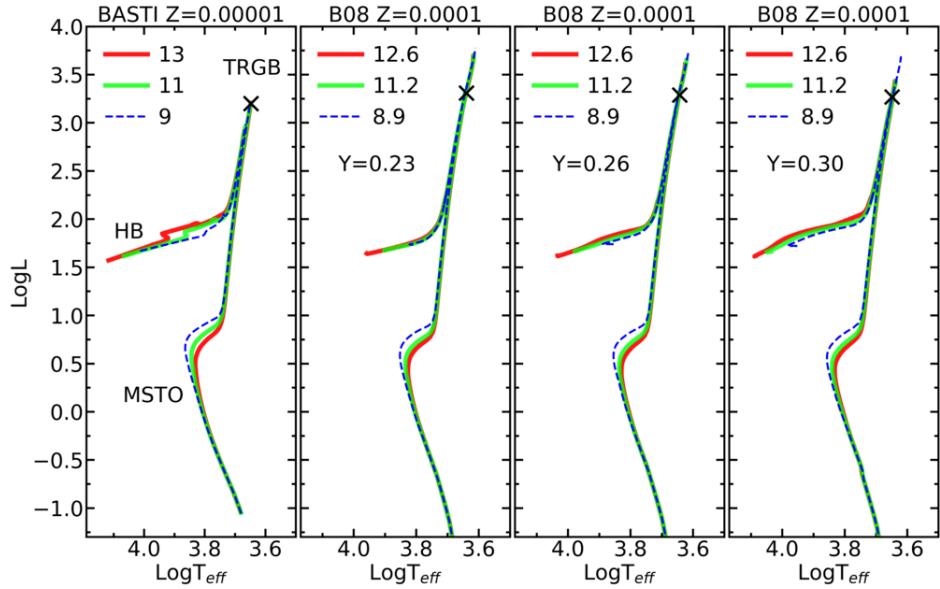


Рисунок 2.2 — Изохроны BASTI [36] с металличностью  $Z = 0.00001$  и B08 [35] с металличностью  $Z = 0.0001$  и разным возрастом и  $Y$ . По осям X и Y соответственно показаны логарифм эффективной температуры в кельвинах ( $\log T_{eff}$ ) и логарифм светимости в солнечной светимости ( $\log L$ ). Изохроны разного возраста (в млрд лет) представлены разными типами линий (см. легенду). Стадии эволюции звезд отмечены на левой панели: TRGB – вершина ветви красных гигантов, HB – горизонтальная ветвь, MSTO – точка поворота Главной последовательности.

деле будут рассматриваться изохроны B08 [35] с изменением  $Y$  и  $Z = 0.0001$  ( $[Fe/H] \sim -2.23$  dex. Отметим, что параметры FWHM и  $I_{core}$  измеряются в линиях водорода  $H_{\delta}$ ,  $H_{\gamma}$  и  $H_{\beta}$ , нормированных на единицу в диапазонах длин волн 4089.05-4115.4 Å, 4318.4-4363.5 Å и 4815.8-4896.5 Å соответственно.

На рисунке 2.2 показано, как изменяются изохроны с возрастом и  $Y$ . С увеличением возраста эффективные температуры звезд точки поворота Главной последовательности (ТПГП) уменьшаются, а для самых горячих звезд ГВ, наоборот, они увеличиваются. С увеличением возраста светимость звезд ТПГП и самых горячих звезд ГВ уменьшается. Аналогичные выводы относительно изменений с возрастом справедливы и для солнечных канонических изохрон BASTI [36] с  $Z = 0.00001$  (левая панель рис. 2.2).

На рисунке 2.3 сравнивается изменение параметров эффективной температуры  $\log T_{eff}$  (слева) и светимости  $\log L$  (справа) с возрастом для звезд ТПГП и звезд на синем конце ГВ. Температуры звезд ТПГП уменьшаются с возрастом. Аналогично ведут себя светимости звезд ТПГП и самых горячих звезд ГВ. С другой стороны,  $\log T_{eff}$  для звезд на горячем конце ГВ нелинейно увеличивает-

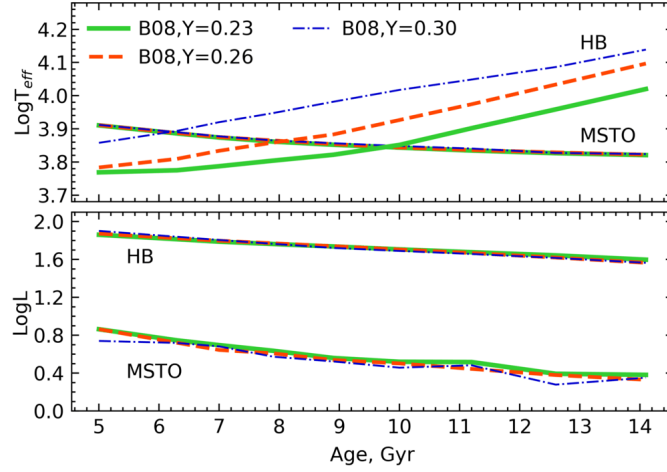


Рисунок 2.3 — Эффективные температуры и светимости звезд точки поворота Главной последовательности (на графике MSTO) и самых горячих звезд горизонтальной ветви (на графике HB) в зависимости от возраста. Изохроны B08 [35] используются для  $Z = 0.0001$ . Данные для разных изохрон показаны разными типами линий, как поясняется в легенде (сплошные, штриховые и штрихпунктирные линии для  $Y = 0.23, 0.26$  и  $0.30$  соответственно).

ся с возрастом с разной скоростью для разных  $Y$ . Если рассматривать изохрону B08, то чем выше значение  $Y$ , тем горячее первая точка ГВ.

Рассмотренные вариации параметров  $\log T_{eff}$  и  $\log L$  существенно влияют на FWHM и  $I_{core}$  бальмеровских линий в спектрах шаровых скоплений, что будет проиллюстрировано ниже. На рисунке 2.4 показано изменение  $I_{core}$  и FWHM с возрастом для трех бальмеровских линий водорода в синтетических спектрах суммарного излучения с металличностью  $Z = 0.0001$ . Модельные зависимости на рисунках 2.4 и 2.5 построены для спектрального разрешения FWHM = 5.5 Å. Синтетические спектры получены с использованием изохрон B08 [35] для  $Y = 0.23, 0.26$  и  $0.30$  (рис. 2.5). На рисунке 2.4 видно, что FWHM и  $I_{core}$  монотонно изменяются с возрастом. Чем выше значение  $I_{core}$ , тем мельче становится линия, т. е. ближе к уровню континуума.

Если при построении синтетических спектров суммарного излучения учитывать этапы горения гелия в эволюции звезд (рис. 2.5), характер изменения FWHM и  $I_{core}$  перестает быть монотонным с возрастом. Во-первых, глубина и FWHM уменьшаются с увеличением возраста, в основном из-за того, что  $T_{eff}$  и светимость звезд ТПГП уменьшаются, но  $T_{eff}$  звезд ГВ увеличивается не так быстро, чтобы компенсировать это уменьшение.

Как только  $T_{eff}$  для самых горячих звезд ГВ превышает  $T_{eff}$  для звезд ТПГП, а  $T_{eff}$  самых горячих звезд ГВ продолжает увеличиваться (рис. 2.3),

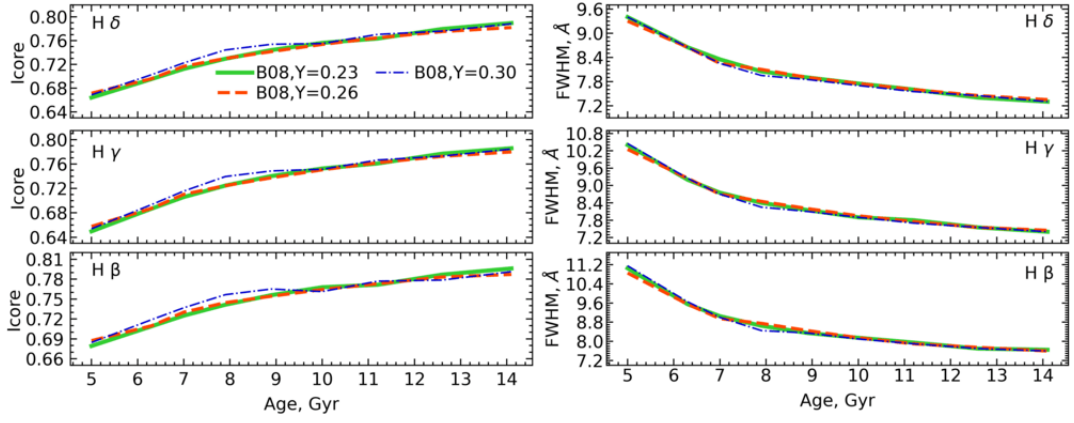


Рисунок 2.4 — Изменение  $I_{core}$  и FWHM с возрастом для трех бальмеровских линий водорода в синтетических спектрах суммарного излучения шаровых скоплений с металличностью  $Z = 0.0001$ . Спектры получены с использованием изохрон B08[35] (сплошная, штриховая и штрихпунктирная линии для  $Y = 0.23, 0.26$  и  $0.30$  соответственно) без учета звезд ГВ.

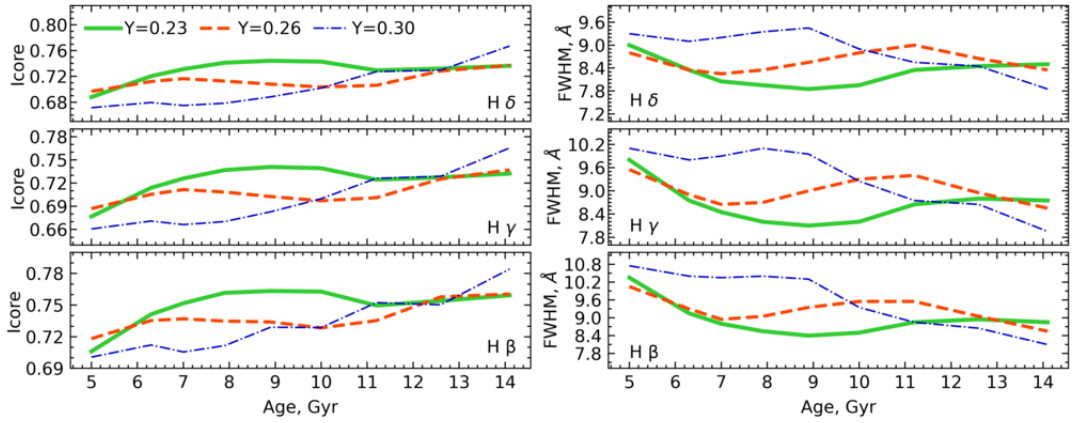


Рисунок 2.5 — То же, что и на предыдущем рисунке, но с включением звезд ГВ.

линии водорода начинают углубляться и становиться шире. Это продолжается до тех пор, пока  $T_{eff}$  не достигнет  $\sim 9000$  К для звезд ГВ, когда интенсивность линий водорода снова начнет уменьшаться. Это связано с интенсивной ионизацией водорода при данной температуре. Таким образом, скорость роста FWHM и  $I_{core}$  у звезд ГВ варьируется в зависимости от возраста. Это связано с тем, как быстро меняется их температура и вклад в суммарный спектр с возрастом.

В работе Sharina et al. 2024 [28] выполнено подобное исследование  $I_{core}$  и FWHM бальмеровских линий для изохрон B08 [35] с  $Z = 0.0004$  ( $[Fe/H] = -1.63$  dex (см. раздел 4.3 и приложение D в работе [28])). В случае  $Z = 0.0004$  изменения  $I_{core}$  и FWHM с возрастом для трех бальмеровских линий водорода аналогичны обсуждаемым выше в случае  $Z = 0.0001$ .

Авторы Lee et al. 2000 [16], а также Percival & Salaris 2011 [66] обнаружили немонотонное изменение индекса  $H_{\beta}$  при рассмотрении горячих звезд

ГВ. Детали моделирования морфологии ГВ в представленном здесь исследовании и литературных исследованиях различаются. Общий вывод состоит в том, что недооценка вклада звезд ГВ в спектры суммарного излучения приводит к недооценке возраста шаровых скоплений. В работе Percival & Salaris 2011 [66] делается важный вывод о сложности учета статистических колебаний числа звезд на ГВ в спектрах реальных скоплений при определении их возраста и металличности. Авторы в Percival & Salaris 2011 [66] обнаружили, что уширение реальных ГВ на CMD и, соответственно, индексы  $H_\beta$  отличаются от моделированных, с помощью задания средней массы и реализации гауссова разброса масс отдельных звезд, приходящих на ГВ для каждой модели эволюции звезд.

Для того чтобы оценить точность определения свойств звезд ГВ с помощью данного метода популяционного синтеза, в разделе 6.1 статьи Sharina et al. 2024 [28] для 35 шаровых скоплений Галактики оценивались различия между  $T_{eff}$  и  $L(L_\odot)$  для звезд ГВ на наблюдаемых CMD и соответствующими точками изохрон. В этой статье оценивались  $T_{eff}$  ярких горячих звезд на синем конце ГВ и  $\log L(L_\odot)$  звезд средней части ГВ путем интерполяции теоретических зависимостей из B08 [35] для звезд ГВ: цвета от  $T_{eff}$  и абсолютной звездной величины от  $\log L(L_\odot)$ . Подробное описание этой процедуры приведено в Приложении E работы Sharina et al. 2024 [28]. Авторами было получено среднеквадратичное отклонение наблюдаемой светимости звезд ГВ от соответствующего теоретического значения  $\text{std}(I_{ГВ}) = 0.19 \pm 0.1$ . Типичное отклонение между теоретическими и наблюдаемыми значениями  $T_{eff}$  звезд в синей части ГВ составило менее 1% для ГВ холоднее 8000 К и 3% для ГВ с  $T_{eff} \sim 10000$  К. Для более горячих ГВ данное отклонение может достигать 4-6%.

Используя данные раздела 6.1 из Sharina et al. 2024 [28] и рисунок 6 из Sharina et al. 2024 [28], показывающий разницу между наблюдаемыми и теоретическими  $T_{eff}$  звезд голубого края ГВ в зависимости от наблюдаемых значений  $T_{eff}$  для 35 шаровых скоплений Галактики, можно оценить максимальную  $T_{eff}$  звезд ГВ, принадлежащих нашей выборке скоплений, в сравнении с выбранными из анализа спектров суммарного излучения изохронами (табл. 5). Наиболее протяженные ГВ принадлежат шаровым скоплениям НIII, С39 и EХТ8 с максимальной  $T_{eff} \sim 12600$  К. Температура горячих звезд ГВ шарового скопления КК  $T_{eff} \sim 10000$  К. Максимальные  $T_{eff}$  остальных четырех шаровых скоплений (РА, В317, В2 и В165) составляет 8000-9000 К.



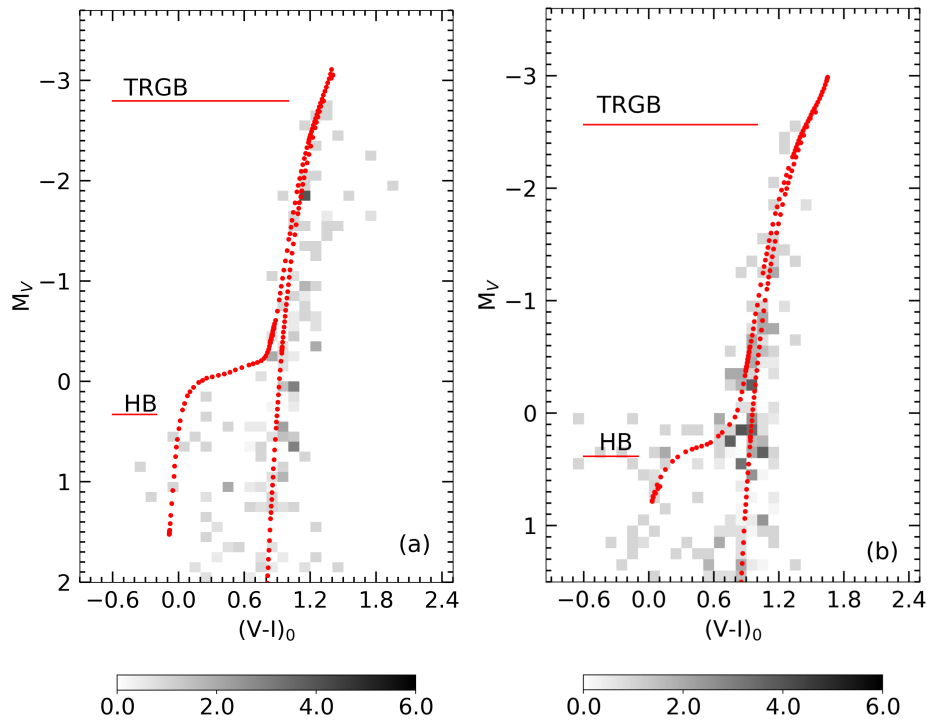


Рисунок 2.6 — Сравнение изохрон, выбранных при моделировании спектра суммарного излучения (табл. 5), с Hess-диаграммами, построенными по наблюдаемым CMD скоплений НШ (а) и В 317 (б) (подробнее см. раздел 2.4.1). На графиках: TRGB – вершина ветви красных гигантов, HB – горизонтальная ветвь.

## 2.4 Сравнение изохрон, подобранных при моделировании спектров суммарного излучения, с наблюдаемыми диаграммами «цвет-звездная величина»

### 2.4.1 НШ и В317

Далее будет проверяться соответствие выбранных при моделировании спектров суммарного излучения шаровых скоплений изохрон наблюдаемым CMD этих объектов. Были построены Hess-диаграммы для НШ и В317 (рис. 2.6) с использованием звездной фотометрии Sharina et al. 2006 [86], выполненной с использованием изображений WFPC2 HST. Круглые апертуры для отбора звезд внутри и вокруг скоплений остались такими же, как определенные в исходной статье. На Hess-диаграммах интенсивность цвета в каждом бине (0.1 mag x 0.1 mag) означает число звезд, подписанное под цветовым баром внизу каждой диаграммы. На рисунке 2.6 показан результат вычитания диаграммы

Таблица 6 — Полученные здесь (отмечены индексом 0) и литературные: (2) избыток цвета рассчитанный согласно [87]; (3) модуль расстояния; (4) абсолютная звездная величина уровня светимости ГВ, вычисленная по формуле (2) из Federici et al. 2012 [88] и оценкам [Fe/H] из таблицы 5; (5) видимая величина уровня светимости горизонтальной ветви.

| Символ<br>объекта | $E(B - V)$<br>зв.вел.              | $(m - M)_0$                         | $M_V^0$<br>(ГВ) | $V^0$<br>(ГВ)      |
|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|--------------------|
| НIII              | $0.17 \pm 0.15^0$<br>$0.175^{M05}$ | $24.36 \pm 0.24^0$<br>$24.15^{M05}$ | 0.33            | $25.25 \pm 0.19^0$ |
| B317              | $0.08 \pm 0.13^0$<br>$0.11^{F08}$  | $24.64 \pm 0.2^0$                   | 0.385           | $25.25 \pm 0.17^0$ |
| EXT8              | $0.06^{L21}$                       | $24.43 \div 24.57^{L21}$            | 0.19            | 24.89              |

Приведены литературные данные из статей [85](L21), [89](F08), [90](M05).

для фона из диаграммы в области скопления. Соответствующие изохроны B08 [35] для НIII и B317 из таблицы 5 наложены на графики. Видно, что между данными и моделями существует разумное согласие. На панелях указаны параметры изохроны, а также модуль расстояния  $(m-M)_0$  и избыток цвета  $E(B-V)^2$  [87], используемые для сопоставления изохрон с наблюдаемым распределением звезд на CMD. Для определения  $(m-M)_0$  и  $E(B-V)$  учитывались следующие характеристики: средний цвет ВКГ на  $\sim 0.5^m$  выше ГВ и уровень светимости горизонтальной ветви  $V_{ГВ}$ , рассчитанный по формуле (2) из Federici et al. 2012 [88] (см. таблицу 6, столбец 4). Эти ориентиры вполне приемлемы для решения задачи, поскольку число звезд вблизи вершины ветви красных гигантов скоплений невелико, а звезды поля, вносящие существенный вклад по численности населения в CMD, мало отличаются по цвету и светимости от звезд, принадлежащих к исследуемым объектам. В таблице 6 показаны литературные  $(m-M)_0$ ,  $E(B-V)$  и данные, полученные здесь, а также абсолютная величина уровня горизонтальной ветви  $M_{V_{ГВ}}$  (столбец 4), рассчитанная по формуле (2) из Federici et al. 2012 [88] и оценки [Fe/H] из таблицы 5. В пятом столбце дана соответствующая величина  $V_{ГВ}$ .

<sup>2</sup>Поглощение в конкретной полосе пропускания описывается формулой  $A_\lambda = R_V \cdot E(B-V)$ , где  $E(B-V)$  – избыток цвета, а  $R_V$  равно 3.1 для закона поглощения типа Млечного Пути [87].

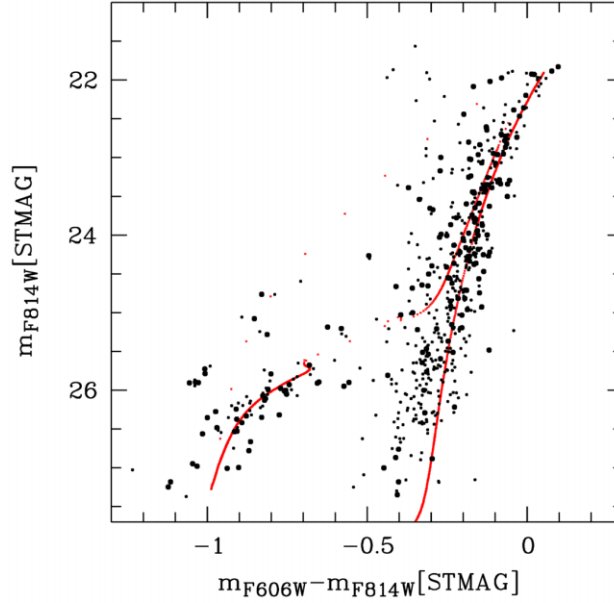


Рисунок 2.7 — Сравнение изохроны, выбранной при моделировании спектра EHT8 (табл. 5), и результатов фотометрии для этого скопления из [85] (подробнее см. раздел 6.1.2 в статье [28]).

## 2.4.2 EHT8

EHT8 – удаленное от центра M31 шаровое скопление, находящееся в гало этой галактики. Его глубокая CMD, полученная в работе Larsen et al. 2021 [85], гораздо меньше загрязнена звездами поля, а фотометрическая глубина больше, чем в случае NIII и V317. Рядом с вершиной ветви красных гигантов на CMD EHT8 довольно много звезд и хорошо видна ГВ [85]. На рисунке 2.7 показана CMD EHT8, построенная в работе Sharina et al. 2024 [28] на основе результатов звездной фотометрии из статьи Larsen et al. 2021 [85]. См. раздел 6.1.2 в статье Sharina et al. 2024 [28], описывающий методы построения CMD.

На рисунке 2.7 можно видеть, что выбранная для анализа спектра суммарного излучения EHT8 каноническая масштабированная к солнечным содержаниям изохрона BASTI [36] с параметрами  $Z = 0.00001$ ,  $\text{Age} = 11 \text{ Gyr}$  и  $Y = 0.245$  адекватно описывает ВКГ и ГВ скопления. Однако следует отметить, что металличность этой изохроны  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3.23 \text{ dex}$  ниже значения, полученного из анализа спектров суммарного излучения  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -2.8 \text{ dex}$  (табл. 7). Использовались  $(m-M)_0 = 24.5$  и  $E(B-V) = 0.06^m$ , полученные в Larsen et al. 2021 [85]. Несмотря на то что металличность изохроны ниже металличности скопления, сравнение  $T_{\text{eff}}$  и  $\log L(L_{\odot})$  для основных эволюционных стадий изохрон BASTI

показало, что выбранная для анализа спектра изохрона имеет наиболее близкие к искомым параметры стадий звездной эволюции среди изохрон используемого набора. Заметим, что полоса нестабильности у выбранной изохроны (рис. 2.7) примерно совпадает с таковой на CMD и с таковой, найденной у [85]. Границы по цвету у полосы нестабильности:  $M_{F606W} - M_{F814W}$  от  $-0.8^m$  до  $-0.5^m$  [85] или  $m_{F606W} - m_{F814W}$   $-0.736^m$  до  $-0.436^m$ , поскольку  $A_{F606W} = 0.168^m$  и  $A_{F814W} = 0.104^m$ . Этот анализ позволяет сделать вывод, что выбор изохроны, представленный здесь (табл. 5), корректен.

## 2.5 Химический состав шаровых скоплений

В таблицах 7, 8 приводятся результаты определения химического состава скоплений выборки методом, описанным в разделе 1.1. На рисунке 2.8 показано сравнение полученного химического состава шаровых скоплений с соответствующим содержанием, полученным методом спектроскопии высокого разрешения для звезд поля Галактики (SM03 [29]; V04 [30]; I13 [31]; E20 [32]; Lu22 [33]) и шаровых скоплений в M31 из работ L22 [20] и C14 [34]. Видно общее согласие содержания шаровых скоплений выборки представленной в данном исследовании с литературными данными. Однако следует отметить, что существуют различия  $\leq 0.2$  dex между литературным и представленным здесь ЛТР-содержанием для шаровых скоплений (см. табл. 7, 8). Исключением является полученное здесь меньшее значение  $[Mn/Fe]$  по сравнению с L22 [20] (рис. 2.8 (d)). Содержание Mn оценивалось с использованием бленды около  $4033 \text{ \AA}$  (см. рис. 2.9). Суммарный вклад интенсивных линий Mn I 4030.76, 4031.79, 4033.07, 4033.58, 4033.65, 4034.49 и  $4035.72 \text{ \AA}$  в эту бленду примерно в 1.5 раза превышает вклад Fe. Следует отметить, что  $[Mn/Fe]$  для шаровых скоплений в среднем выше, чем для звезд поля. Низкое содержание Mn в карликовых галактиках послужило индикатором наличия в этих объектах белых карликов прародителей сверхновых типа Ia (SNe Ia) с массой ниже предела Чандрасекара [91].

Следует также отметить, что почти все шаровые скопления представленной здесь выборки, кроме B317 и B165, имеют низкую ( $[Mg/Fe] \leq 0$ ) по сравнению со звездами поля, для которых  $[Mg/Fe] \sim 0.4$  dex. Mg – это элемент

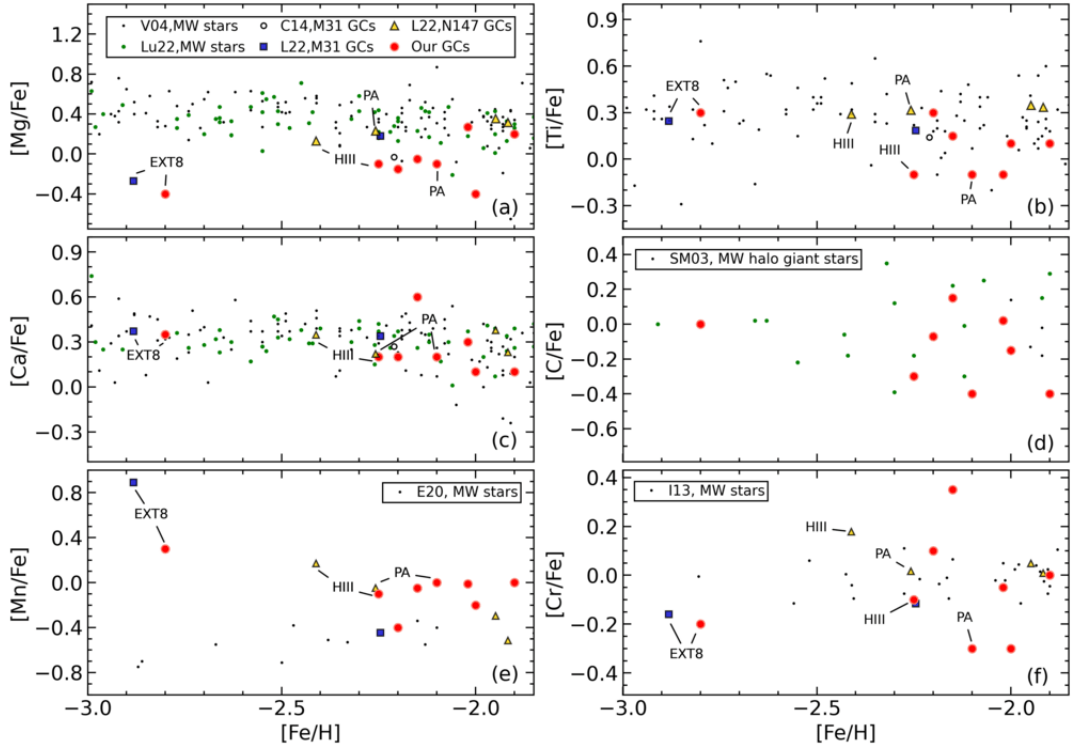


Рисунок 2.8 — ЛТР-содержания химических элементов для звезд нашей Галактики (мелкие точки) и шаровых скоплений в М31 и ее соседей (большие символы), полученные из анализа их спектров суммарного излучения. Значения, полученные в этом исследовании, показаны большими закрашенными красными кружками. Большие светлые кружки обозначают содержание для шаровых скоплений в М31 из С14 [34]. Большие закрашенные квадраты и треугольники показывают содержание ЛТР для шаровых скоплений в М31 и ее соседей из статьи L22 [20]. Маленькие точки указывают данные для звезд поля Галактики из Lu22 [33] (панели (а), (с) и (d)), V04 [30] (панели (а), (b) и (с)), SM03 [29] (панель d), E20 [32] (панель e) и I13 [31] (панель f).

$\alpha$ -процесса, который в основном образуется в результате взрывного сгорания углерода в массивных звездах и в сверхновых с коллапсом ядра (CCSNe). В отличие от Mg, Ca, содержание которого кажется нормальным по сравнению со звездами поля (рис. 2.8), в основном образуется в CCSNe и SNe Ia. Низкие значения  $[Mg/Fe]$  для шаровых скоплений, полученные по спектрам суммарного излучения, рассматривались как свидетельство присутствия множественных звездных населений в шаровых скоплениях (например, Larsen et al. 2022 [20]). Низкие  $[Mg/Fe] \sim -0.24$  dex были получены в Sharina et al. 2018 [92]) по спектрам суммарного излучения низкометаллических шаровых скоплений Галактики NGC6341 и NGC7078. Эти результаты согласуются с открытием в работе Masseron et al. 2019[93] звезд с крайним обеднением магнием в этих шаровых скоплениях и антикорреляции Mg-Al среди звезд скоплений. Обеднение дости-

Таблица 7 — Содержание химических элементов, полученное здесь (отмечены верхним индексом 0) для восьми шаровых скоплений в М31 при моделировании их спектров суммарного излучения.

| Символ<br>Объекта | [C/Fe]<br>(dex)    | [Mg/Fe]<br>(dex)       | [Ca/Fe]<br>(dex)      |
|-------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|
| РА                | $-0.40 \pm 0.12^0$ | $-0.10 \pm 0.13^0$     | $0.20 \pm 0.08^0$     |
|                   |                    | $0.23 \pm 0.1^{L22}$   | $0.22 \pm 0.05^{L22}$ |
| НIII              | $-0.3 \pm 0.15^0$  | $-0.10 \pm 0.15^0$     | $0.20 \pm 0.11^0$     |
|                   |                    | $0.13 \pm 0.1^{L22}$   | $0.35 \pm 0.05^{L22}$ |
| С39               | $-0.07 \pm 0.13^0$ | $-0.15 \pm 0.13^0$     | $0.20 \pm 0.09^0$     |
| В317              | $0.02 \pm 0.17^0$  | $0.27 \pm 0.17^0$      | $0.30 \pm 0.13^0$     |
| В2                | $-0.15 \pm 0.1^0$  | $-0.4 \pm 0.17^0$      | $0.10 \pm 0.15^0$     |
| В165              | $-0.40 \pm 0.1^0$  | $0.20 \pm 0.12^0$      | $0.10 \pm 0.09^0$     |
| ЕХТ 8             | $0.00 \pm 0.14^0$  | $-0.40 \pm 0.17^0$     | $0.35 \pm 0.09^0$     |
|                   |                    | $-0.27 \pm 0.22^{L22}$ | $0.37 \pm 0.06^{L22}$ |
| КК                | $0.15 \pm 0.02^0$  | $-0.05 \pm 0.12^0$     | $0.60 \pm 0.06^0$     |

Во второй строке показаны литературные содержания из L22 [20].

гает  $[Mg/Fe] \sim -0.5$  dex. Еще более сильное обеднение магнием, вероятно, существует для ЕХТ8 и В2, как следует из анализа их спектров суммарного излучения (Larsen et al. 2022 [20], табл. 7).

Значения  $[C/Fe]$ , определенные здесь по спектрам суммарного излучения в оптическом диапазоне, согласуются со значениями для звезд поля Галактики, но в среднем выше, чем  $[C/Fe]$  для звезд ВКГ в шаровых скоплениях Галактики (Roediger et al. 2014 [94]). Из литературы известно, что содержания легких элементов: Li, C, N и O в звездных атмосферах изменяются в процессе подъема по ветви красных гигантов (см. например [95; 96]). Таким образом, различие между значениями  $[C/Fe]$ , полученными при анализе спектров суммарного излучения шаровых скоплений, и соответствующим содержанием углерода у звезд ветви красных гигантов в шаровых скоплениях обусловлено изменением химического состава звездных атмосфер в ходе их эволюции.

Относительно точности оценок  $[C/Fe]$  по спектрам суммарного излучения низкого разрешения следует отметить, что вклад углерода в полосу СН 4240-4330 Å примерно в пять раз превышает вклад кислорода. Содержание других элементов (Ti, Mg, Si, Ca, Al и Fe), линии которых вносят вклад в полосу СН, можно определить независимо, используя другие особенности поглощения в спектре. Дополнительным тестом правильности  $[C/Fe]$ , полученного по поло-

Таблица 8 — Продолжение таблицы 7.

| Символ<br>объекта | [Ti/Fe]<br>(dex)      | [Cr/Fe]<br>(dex)       | [Mn/Fe]<br>(dex)       |
|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| РА                | $-0.10 \pm 0.20^0$    | $-0.30 \pm 0.20^0$     | $0.00 \pm 0.20^0$      |
|                   | $0.32 \pm 0.09^{L22}$ | $0.02 \pm 0.88^{L22}$  | $-0.05 \pm 0.13^{L22}$ |
| НШ                | $-0.10 \pm 0.19^0$    | $-0.10 \pm 0.20^0$     | $-0.10 \pm 0.21^0$     |
|                   | $0.29 \pm 0.08^{L22}$ | $0.18 \pm 0.10^{L22}$  | $0.17 \pm 0.13^{L22}$  |
| С39               | $0.30 \pm 0.18^0$     | $0.10 \pm 0.17^0$      | $-0.4 \pm 0.19^0$      |
| В317              | $-0.10 \pm 0.21^0$    | $-0.05 \pm 0.22^0$     | $-0.01 \pm 0.22^0$     |
| В2                | $0.10 \pm 0.2^0$      | $-0.30 \pm 0.4^0$      | $-0.20 \pm 0.30^0$     |
| В165              | $0.10 \pm 0.18^0$     | $0.00 \pm 0.20^0$      | $0.00 \pm 0.20^0$      |
| ЕХТ 8             | $0.30 \pm 0.18^0$     | $-0.20 \pm 0.19^0$     | $0.30 \pm 0.20^0$      |
|                   | $0.24 \pm 0.08^{L22}$ | $-0.16 \pm 0.16^{L22}$ | $0.89 \pm 0.17^{L22}$  |
| КК                | $0.15 \pm 0.06^0$     | $0.35 \pm 0.08^0$      | $0.10 \pm 0.30^0$      |

се СН, служат другие молекулярные линии с участием С, например, полоса СН при 4120-4220 Å. Спектральные особенности с доминированием кислорода в изученных спектрах отсутствуют. Поэтому [O/Fe] оценивается косвенно и зависит от [C/Fe]. Содержание кислорода устанавливали в пределах [O/Fe]  $\sim 0.3 \div 0.5$  dex. В работе Sharina et al. 2020 [24] было продемонстрировано, что [C/Fe] для шаровых скоплений Галактики, полученные методом, описанным в разделе 1.1, примерно на 0.4 dex выше, чем значения, полученные с помощью спектроскопии высокого разрешения, для некоторых самых ярких звезд в этих скоплениях. Однако нет систематических различий между содержаниями [C/Fe], полученными с использованием одних и тех же спектров шаровых скоплений Галактики из Schiavon et al. 2005 [97] в работах Conroy et al. 2018 [98] и Sharina et al. 2020 [24].

## 2.6 Заключение к главе 2

В главе представлены результаты определения возраста, Y и химического состава (Fe, C, Mg, Ca, Mn, Ti и Cr) для 8 внегалактических шаровых скоплений в близких группах галактик: M31 и Centaurus A. Возраст скоплений определен в интервале  $10 \leq T \leq 13.6$  Gyr. Содержания элементов Ca, Ti, C и Cr хорошо соответствуют содержаниям звезд поля Галактики. Содержание углерода выше, чем соответствующие данные для звезд ветви красных гигантов в шаро-

вых скоплениях Галактики [94]. Это связано с изменением химического состава звездных атмосфер в ходе их эволюции. Почти все объекты нашей выборки, за исключением В317 и В165, имеют низкое содержание Mg ( $[Mg/Fe] \leq 0$ ) по сравнению со звездами поля, у которых  $[Mg/Fe] \sim 0.4$  dex (см. рис.2.8 (а)). Это указывает на присутствие множественных звездных населений [20] и звезд с чрезвычайно низким содержанием Mg [93] в этих скоплениях.

Для исследования влияния звезд горизонтальной ветви на спектр суммарного излучения были построены зависимости  $I_{core}$  и FWHM водородных линий серии Бальмера в синтетических спектрах от возраста. Учет стадии ГВ приводит к немонотонному изменению данных зависимостей в отличие от случая учета столько более ранних стадий звездной эволюции до ГВ. Можно сделать вывод, что недооценка вклада звезд ГВ в спектр суммарного излучения может приводить к недооценке возраста шарового скопления.

Из анализа спектров и сравнение выбранных для анализа изохрон с наблюдаемыми CMD скоплений НШ, В317 и ЕХТ8 определены параметры ГВ исследуемых объектов. Скопления НШ, С39 и ЕХТ8 имеют голубые протяженные горизонтальные ветви с максимальной  $T_{eff} \sim 12\ 600$  К. Скопление КК содержит горячие звезды горизонтальной ветви с  $T_{eff} \sim 10\ 000$  К. Максимальная  $T_{eff}$  звезд горизонтальной ветви в других четырех скоплениях (РА, В317, В2 и В165) составляет 8000 – 9000 К.

Были построены Hess-диаграммы по данным звездной фотометрии из работы Sharina et al. 2006 [86] для скоплений НШ, В317. Из сравнения используемых для анализа спектров этих скоплений изохрон с наблюдаемыми Hess-диаграммами были получены следующие модули расстояния и избытки цвета для НШ и В317 соответственно:  $(m-M)_0 = 24.36 \pm 0.24$ ,  $24.64 \pm 0.2$  и  $E(B-V) = 0.17^m \pm 0.15$ ,  $0.08^m \pm 0.13$ . Эти значения находятся в согласии с литературными данными. Для скопления ЕХТ8 была построена CMD по данным звездной фотометрии из Larsen et al. 2021 [85]. Сравнение подобранной для анализа спектра изохроны с CMD показывает корректность выбора изохроны.



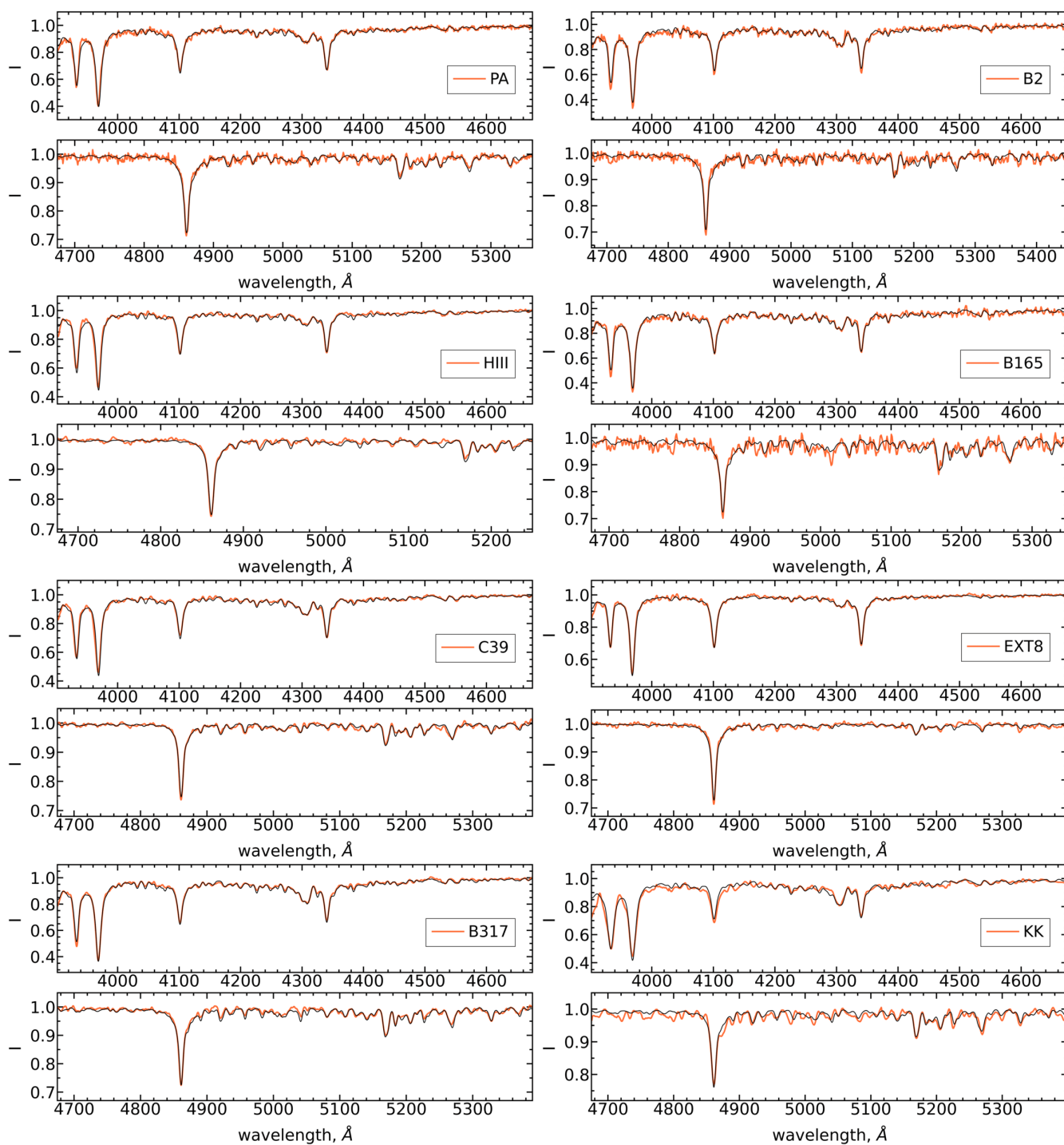


Рисунок 2.9 — Сравнение спектров исследуемых скоплений с модельными, рассчитанные с параметрами изохрон, представленными в таблице 5, и содержаниями элементов, представленными в таблицах 7, 8.

## Глава 3. Исследование спектров четырех шаровых скоплений M31 в проекционной близости к NGC205

### 3.1 Постановка задачи

M31 является ближайшей к нам спиральной галактикой и исследование свойств ее звездных населений представляет большой интерес. Система шаровых скоплений M31 – одна из наиболее изученных (см., например, [9; 99; 100] и ссылки в этих статьях). Однако в литературе представлены в основном интегральные характеристики шаровых скоплений в M31 (цвета, спектральные индексы) с целью определения их возраста и металличности путем сравнения с моделями простых звездных населений (см., например, [101–104]). Спектроскопия высокого разрешения ( $R > 20\,000$ ) суммарного излучения ярких скоплений в M31 была выполнена в работах Colucci et al. 2014 [34] и Sakari et al. 2016 [22]. Как отмечается в работе Sakari et al. 2014 [105], 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 глава посвящена исследованию спектров суммарного излучения низкого разрешения четырех ярких шаровых скоплений промежуточной металличности ( $[Fe/H] = -1.1..-0.75$  dex) в M31: Vol6, Vol20, Vol45 и Vol50. Скопления имеют близкие небесные координаты, однако их лучевые скорости различны (см. табл. 9). Объекты расположены в области неба между M31 и ее спутником – карликовой эллиптической галактикой NGC205, находящейся на расстоянии 0.824 Мпк от Солнца, согласно McConnachie et al. 2005 [90]. Основные свойства скоплений перечислены в таблице 9. В первом столбце приведены идентификаторы из Galleti et al. 2004 [67], далее – прямые восхождения и склонения,

Таблица 9 — Литературные характеристики выборки четырех ярких шаровых скоплений выборки.

| Об.   | RA DEC (2000) |             | V<br>зв.вел. | E(B-V) <sup>a</sup><br>зв.вел. | Vel <sup>a</sup><br>км/с | R <sub>M31</sub> <sup>b</sup><br>кпк | R <sub>h</sub> <sup>c</sup><br>пк |
|-------|---------------|-------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
|       | hh:mm:ss      | gr:mm:ss    |              |                                |                          |                                      |                                   |
| Vol6  | 00:40:26.47   | +41:27:26.6 | 15.97        | 0.17                           | -232.4±6                 | 6.3                                  | 1.86                              |
| Vol20 | 00:40:55.26   | +41:41:25.3 | 16.13        | 0.11                           | -345.4±5                 | 7.3                                  | 3.17                              |
| Vol45 | 00:41:43.11   | +41:34:20.1 | 15.14        | 0.18                           | -419.4±6                 | 4.8                                  | 2.85                              |
| Vol50 | 00:41:46.27   | +41:32:18.4 | 16.79        | 0.25                           | -109.5±6                 | 4.4                                  | -                                 |

a – [77]; b – [100]; c – [107]

видимые звездные величины в фильтре V фотометрической системы Джонсона-Казинса, избытки цвета E(B-V)<sup>1</sup>, лучевые скорости, проекционные расстояния от центра M31, радиусы на половине светимости.

В данной главе представлено сравнение полученных характеристик четырех исследуемых скоплений и имеющихся в литературе данных для этих и других шаровых скоплений в M31 и NGC205, а также для звезд и скоплений в нашей Галактике. Выполнено сравнение изохрон, подобранных при анализе спектров суммарного излучения скоплений Vol6 и Vol45, с имеющимися CMD скоплений по результатам звездной фотометрии на снимках HST и определены расстояния до скоплений. Сравнение с литературными данными иллюстрирует возможности применяемого метода, который позволяет существенно расширить имеющуюся информацию о свойствах звездных населений изучаемых объектов. Результаты исследования были представлены в работах Maricheva 2021 [108] и Sharina & Maricheva 2022 [109].

### 3.2 Наблюдательные данные и анализ полученных спектров

Спектры суммарного излучения скоплений Vol6, 20, 45, 50 были получены авторами Maricheva 2021 [108] на телескопе БТА 19.09.2020. Журнал наблюдений на телескопе БТА приводится в таблице 10. Редукция длиннощелевых спектров выполнялась аналогичным способом, описанным в разделе 2.2. Для увеличения отношения сигнал/шум также использовались спектры, получен-

<sup>1</sup> $E(B - V) = A_B - A_V$ , где  $A_B$  и  $A_V$  — поглощение света в звездных величинах в фильтрах B и V соответственно. Согласно [106],  $A_V = 3.315E(B - V)$ ,  $A_I = 1.940E(B - V)$ .

Таблица 10 — Журнал наблюдений на телескопе БТА.

| Объект | Дата     | $t_{exp}$<br>(сек.) | SNR<br>(4500Å) | Seeing<br>угл.сек. |
|--------|----------|---------------------|----------------|--------------------|
| Vol6   | 19.09.20 | 3x900               | 75             | 2.5                |
| Vol20  | 19.09.20 | 3x900               | 100            | 1.5                |
| Vol45  | 19.09.20 | 3x600               | 121            | 2.5                |
| Vol50  | 19.09.20 | 3x900               | 56             | 1.5                |

Таблица 11 — Результаты определения металличности и содержания химических элементов методом популяционного синтеза для изохрон B08 [35].

| Об.   | Изохрона<br>(Z, Y, log(Age)) | [Fe/H]<br>(dex) | [C/Fe]<br>(dex) | [N/Fe]<br>(dex) | [Mg/Fe]<br>(dex) | [Ca/Fe]<br>(dex) | [Mn/Fe]<br>(dex) | [Ti/Fe]<br>(dex) | [Cr/Fe]<br>(dex) |
|-------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Vol6  | 0.004,0.30,10.05             | -0.75           | 0.2             | 1.55            | 0.67             | 0.55             | -0.5             | 0.1              | 0.0              |
| Vol45 | 0.001,0.26,10.05             | -1.1            | 0.3             | 0.7             | 0.65             | 0.5              | -0.5             | 0.2              | 0.0              |
| Vol50 | 0.002,0.26,10.10             |                 | 0.03            | 0.7             | 0.5              | 0.2              | -0.3             | 0.1              | -0.1             |
| Vol20 | 0.002,0.26,10.15             | -1.0            | 0.05            | 1.4             | 0.5              | 0.38             | -0.5             | 0.2              | 0.0              |

ные Caldwell et al. 2011 [77] во время наблюдений на спектрографе Nectospec [82] 6.5-м телескопа ММТ. Суммирование спектров выполнялось аналогично способу описанному в разделе 2.2.

Методом, описанным в разделе 1.1, определены возраст, металличность [Fe/H], Y и содержание химических элементов (C, N, Mg, Ca, Ti, Cr и Mn) исследуемых объектов из анализа их спектров суммарного излучения. В таблицах 11 и 12 приведены результаты определения параметров изохрон B08 [35] и BASTI [36], используемых при моделировании спектров, а также соответствующее содержание химических элементов. Изохроны в данной работе подбирались

Таблица 12 — Результаты определения металличности и содержания химических элементов методом популяционного синтеза для изохрон BASTI [36].

| Об.   | Изохрона<br>(Z, Y, Age(Gyr)) | [Fe/H]<br>(dex) | [C/Fe]<br>(dex) | [N/Fe]<br>(dex) | [Mg/Fe]<br>(dex) | [Ca/Fe]<br>(dex) | [Mn/Fe]<br>(dex) | [Ti/Fe]<br>(dex) | [Cr/Fe]<br>(dex) |
|-------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Vol6  | 0.004,0.25,14                | -0.75           | 0.0             | 1.35            | 0.52             | 0.43             | -0.5             | 0.23             | -0.05            |
| Vol45 | 0.002,0.25,10                | -1.1            | 0.1             | 0.7             | 0.6              | 0.4              | -0.3             | 0.2              | 0.0              |
| Vol50 | 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              |
| Vol20 | 0.002,0.25,12                | -1.0            | 0.15            | 1.3             | 0.5              | 0.5              | -0.6             | 0.2              | 0.1              |

вручную по форме и глубине водородных линий серии Бальмера, а также 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). Во второй колонке каждой из таблиц приведены параметры используемых изохрон: металличность  $Z$ , удельное содержание гелия  $Y$  и возраст в млрд лет. Содержание  $[O/Fe]$  для всех объектов принималось равным 0.3 dex, так как для него нет наблюдательных деталей в исследуемом спектральном диапазоне, однако  $[O/Fe]$  влияет на результаты определения содержаний других элементов, в частности, C и N.

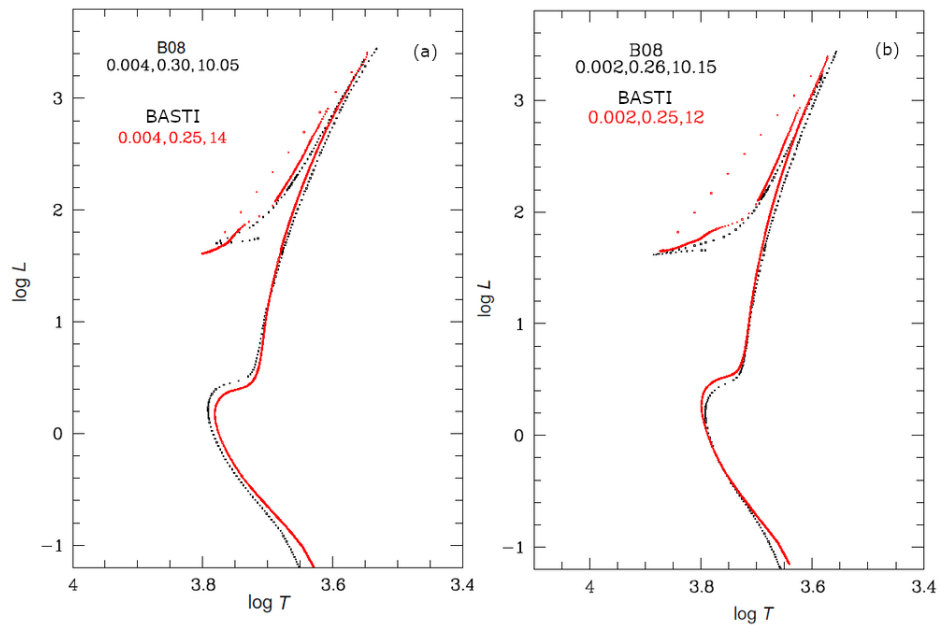


Рисунок 3.1 — Слева сравнение изохроны B08:  $Z = 0.004, Y = 0.30, \log(Age) = 10.05$  и изохроны BASTI:  $Z = 0.004, Y = 0.25, Age = 14$  млрд лет, использованные для Vol6. Справа сравнение изохрон B08:  $Z = 0.002, Y = 0.26, \lg(Age) = 10.15$  и BASTI:  $Z = 0.002, Y = 0.25, Age = 12$  млрд лет, использованных для Vol20.

Скопления Vol45 и Vol50 имеют практически идентичные спектры (см. рис. 9 в работе Maricheva 2021 [108]), поэтому их химический состав и используемые для построения модельных спектров изохроны подобраны одинаковыми (таблицы 11 и 12). 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 ГВ, ТПГП и вершины ветви красных гигантов, что влияет на глубину и форму атомарных и молекулярных линий. Сравнение изохрон, использованных для моделирования спектра Vol6, показано слева на рисунке 3.1. По осям X и Y соответственно отложены логарифм эффективной температуры  $\log T_{eff}$  в Кельвинах и логарифм

рифом светимости  $L_{\odot}$  в светимостях Солнца. В случае Bol6 (рис. 3.1) отличие по температуре и светимости ТППП моделей звездной эволюции, обеспечивающих наилучшее соответствие между синтетическими и наблюдательными спектрами:  $\Delta T = 10^{lgT_1} - 10^{lgT_2} = 140K$ ,  $\Delta L = 10^{lgL_1} - 10^{lgL_2} = 0.22L_{\odot}$ .

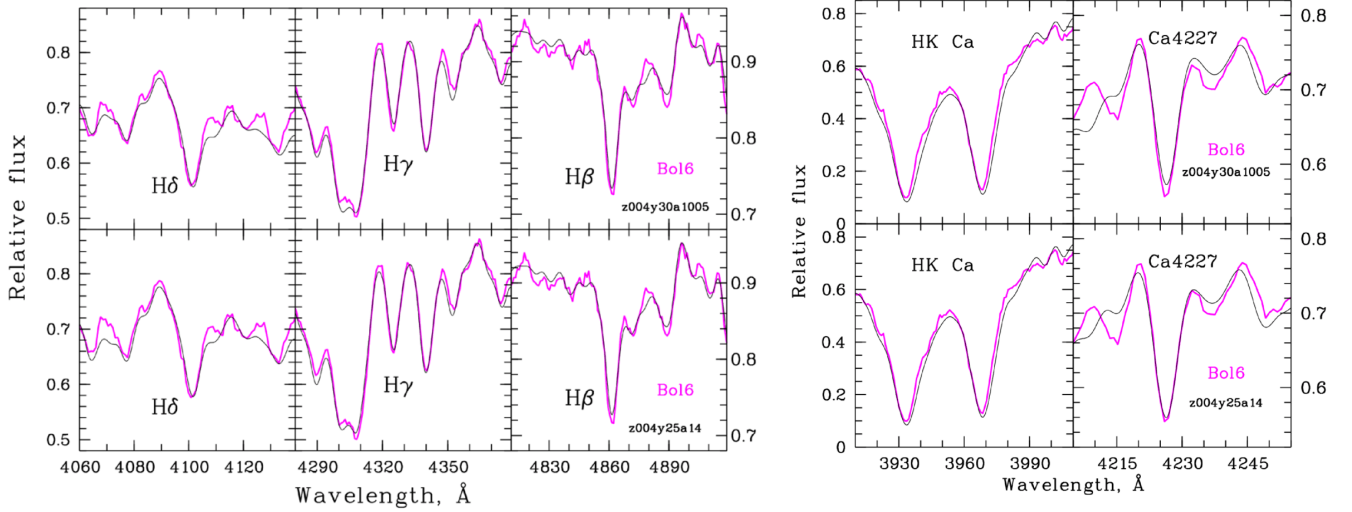


Рисунок 3.2 — Сравнение спектра скопления Bol6 (розовая линия) с модельным в области водородных линий (слева) и линий Ca II K и H и Ca I 4227 Å (справа). Верхняя панель: модельный спектр, рассчитанный с изохроной B08:  $Z = 0.004$ ,  $Y = 0.30$ ,  $\log(Age) = 10.05$ ; нижняя панель — с изохроной BASTI:  $Z = 0.004$ ,  $Y = 0.25$ ,  $Age = 14$  млрд лет.

На рисунке 3.2 показано сравнение модельных спектров с наблюдаемыми для Bol6 в области водородных линий и линий K и H Ca II 3933.7 Å и 3968.5 Å. Видно, что модель B08 с параметрами  $Z = 0.004$ ,  $Y = 0.30$ ,  $\log Age = 10.05$  предпочтительнее при писании профиля линии Hβ, но изохрона BASTI с параметрами  $Z = 0.004$ ,  $Y = 0.25$ ,  $Age = 14$  млрд лет 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 3.3).

Сравнение изохрон, использованных для моделирования спектров Bol45 и Bol50, показано на рисунке 3.3. Отличие по температуре и светимости для голубого конца ГВ у изохрон BASTI  $\Delta T = 961$  K,  $\Delta L = 3.5 L_{\odot}$ . Изохроны B08 имеют следующие отличия по температуре и светимости для голубого конца ГВ:  $\Delta T = 421$  K,  $\Delta L = 3.3 L_{\odot}$  и для звезд ТППП:  $\Delta T = 291$  K,  $\Delta L = 0.17 L_{\odot}$ . Для Bol45 и Bol50 все использованные модели звездной эволюции дают практически одинаковые оценки  $[Fe/H]$  при сравнении построенных синтетических

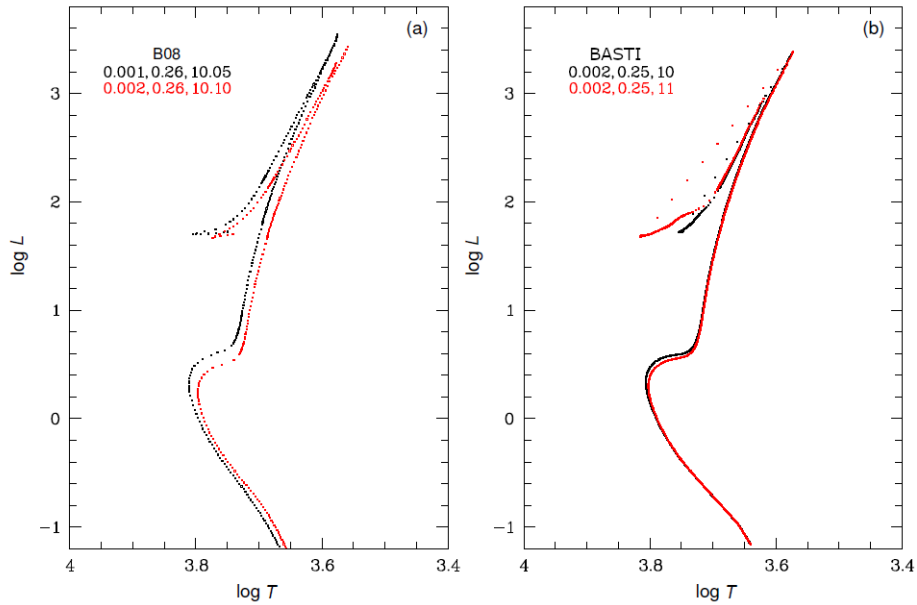


Рисунок 3.3 — (a) – сравнение изохрон B08:  $Z = 0.001, Y = 0.26, \lg(\text{Age}) = 10.05$  и  $Z = 0.002, Y = 0.26, \lg(\text{Age}) = 10.10$ . (b) – сравнение изохрон BASTI:  $Z = 0.002, Y = 0.25, \text{Age} = 10$  млрд лет и  $Z = 0.002, Y = 0.25, \text{Age} = 11$  млрд лет, использованных для моделирования спектров Vol45 и Vol50.

спектров с наблюдаемыми. Однако содержание других химических элементов отличается в зависимости от выбора изохроны (таблицы 11 и 12). Синтетические спектры (рис. 3.4), построенные с выбранными изохронами BASTI, лучше описывают водородные линии в наблюдаемых спектрах Vol45 и Vol50 и дают близкие оценки возраста и меньший разброс по определяемому содержанию 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 Vol20 изохроны B08 и BASTI, подобранные в процессе моделирования спектров (правая панель рис. 3.1), и соответствующие содержания элементов в таблицах 11 и 12 обеспечивают хорошее описание наблюдаемых спектров модельными. Сравнение между этими изохронами показывает, что отличия между ними по температуре и светимости для голубого конца ГВ составляют  $\Delta T = 140$  K,  $\Delta L = 2.9 L_{\odot}$ , а для ТПП —  $\Delta T = 143$  K,  $\Delta L = 0.18 L_{\odot}$ .

Сравнение полных спектров четырех исследуемых скоплений с синтетическими и друг с другом, а также их сравнение в области водородных линий приведено на ftp-сайте САО<sup>2</sup>. Сравнение подтверждает сделанные в этом раз-

<sup>2</sup><ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/GC4M31/>

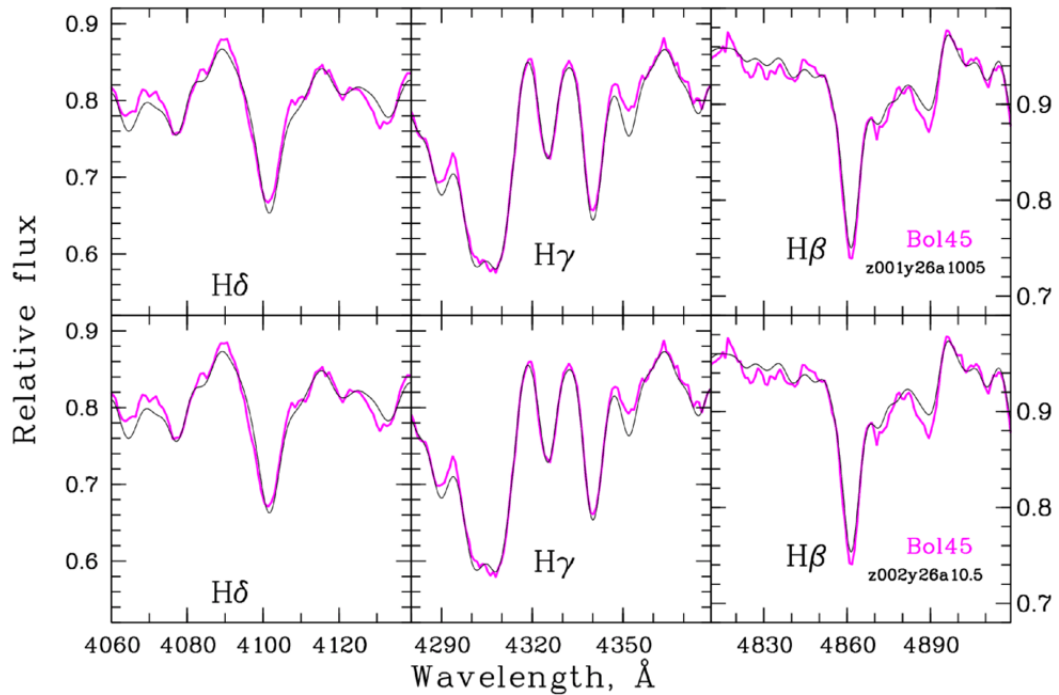


Рисунок 3.4 — Сравнение спектра скопления Bol45 (розовая линия) с модельным в области водородных линий. Верхняя панель – модельный спектр, рассчитанный с изохроной V08:  $Z = 0.001, Y = 0.26, \lg(Age) = 10.05$ ; нижняя панель — с изохроной BASTI:  $Z = 0.002, Y = 0.25, Age = 10.5$  млрд лет.

деле выводы: у Bol20 наиболее интенсивные водородные линии по сравнению с остальными объектами. Оно старше остальных скоплений выборки. Bol6 — самый высокометаллический объект выборки. По возрасту он близок к Bol45 и Bol50, так как форма и интенсивность водородных линий у этих трех скоплений почти одинаковы.

Полных аналогов изученным скоплениям в нашей Галактике из работы Schiavon et al. 2005 [97] по возрасту, содержанию гелия и химическому составу найти не удалось. Ближайшим аналогом для Bol45 подобрано шаровое скопление Галактики NGC6637, для Bol6 — соответственно, скопления NGC104 и NGC6652. Сравнение спектров приведено на ftp-сайте CAO<sup>3</sup>, химический состав сравнивается на рис. 7 в работе Sharina & Maricheva 2022 [109]. На рисунке 3.5 показано сравнение CMD Bol6 и Bol45 (из работы Federici et al. 2012 [88]) и CMD их скоплений аналогов NGC104, NGC6652 и NGC6637 (из работы Sarajedini et al. 2007 [110]). Сравнение подобранных по спектрам изохрон с наблюдаемыми CMD скоплений Bol6, Bol45 будет обсуждаться в разделе 3.3.

<sup>3</sup><ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/GC4M31/bol6/> — для Bol6; <ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/GC4M31/bol45/> — для Bol45 и Bol50.



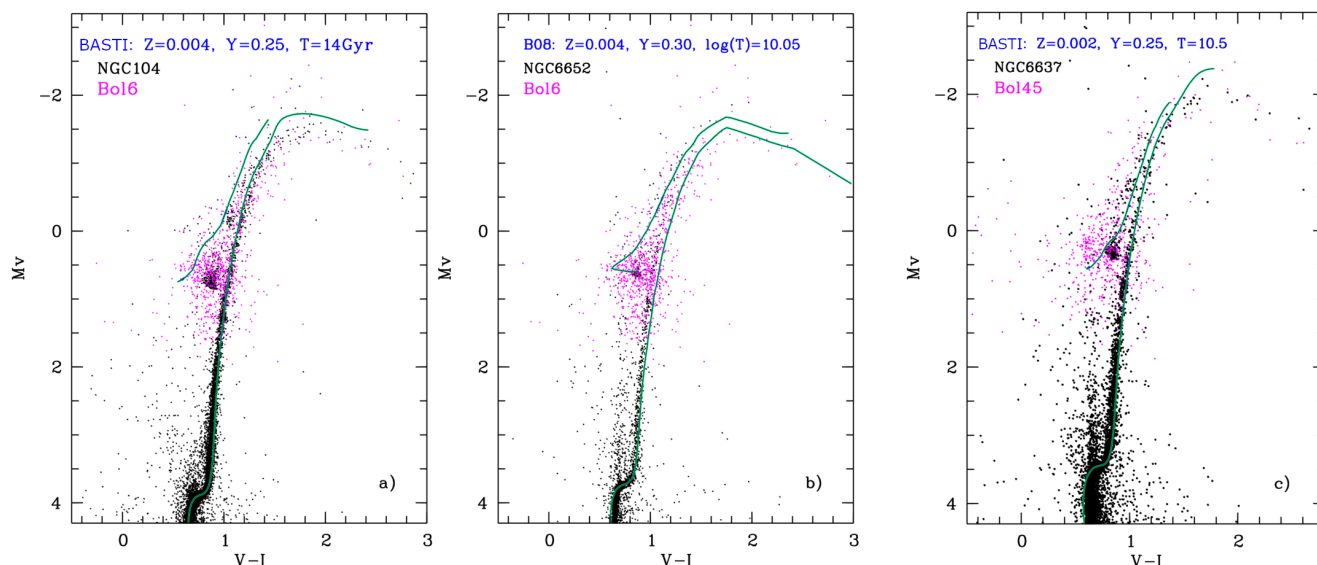


Рисунок 3.5 — CMD для Vol6 (панели a,b) и Vol45 (панель c) (розовые точки) в сравнении с CMD для шаровых скоплений Галактики NGC104, 6652 и 6637 (черные точки) и эволюционными изохронами (зелеными линиями) B08 для Vol6 (панель b) и BASTI для Vol6 (панель a) и для Vol45 (панель c).

### 3.3 Диаграммы «цвет-звездная величина» для скоплений по литературным данным

Для Vol6 и Vol45 в литературе имеются данные широкополосной фотометрии из Ajhar et al. 1996 [111], 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. 3.6 и 3.7 показано сравнение выбранных изохрон (таблицы 11 и 12) с наблюдаемыми CMD, основанное на литературных значениях уровня светимости горизонтальной ветви  $V_{ГВ}$  из работы Federici et al. 2012 [88], а также на металличности и возрасте, определенных здесь в результате анализа спектров. Глубина CMD, построенных по данным фотометрии, ниже ГВ примерно на 1 зв. вел., что позволяет с осторожностью утверждать, что у скоплений красные ГВ (рис. 3.6 и 3.7). Звезды фона вносят вклад в CMD исследуемых скоплений [88]. В таблице 13 даны полученные в результате описанного здесь исследования с данными звездной фотометрии металличность, избытки цвета  $E(B-V)$ , а также модули расстояния до Vol6 и Vol45 в сравнении с соответствующими зна-

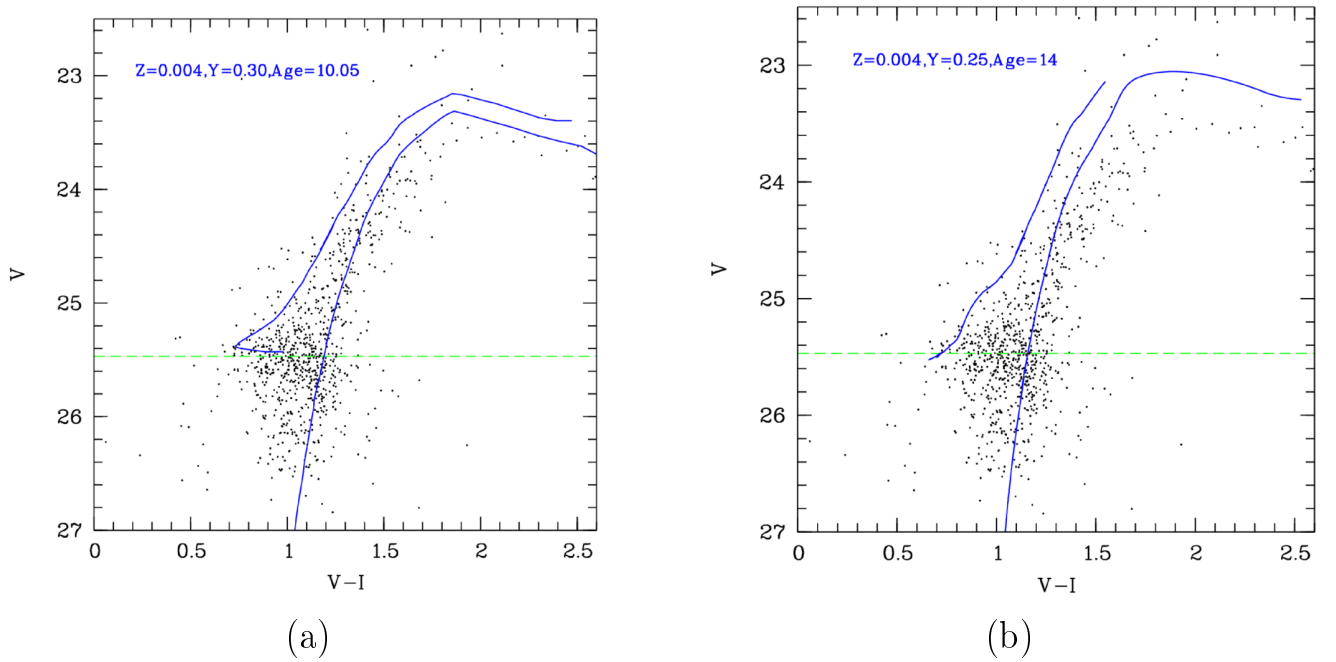


Рисунок 3.6 — (a) — сравнение CMD Vol6 с изохронами B08,  $E(B-V) = 0.08$ ,  $(m-M)_0 = 24.57$ . (b) — сравнение CMD Vol6 с изохронами BASTI,  $E(B-V) = 0.08$ ,  $(m-M)_0 = 24.51$ . Зеленой штриховой линией на обоих графиках показан уровень  $V_{\text{ГВ}}$  из [88]).

чениями, взятыми из литературы. В последней колонке в скобках указан метод определения расстояния: НВ – светимость звезд горизонтальной ветви, TRGB – светимость вершины ветви красных гигантов. Также приведены  $V_{\text{ГВ}}$  скоплений по данным из литературы. Из таблицы следует, что определенные в данной работе  $E(B-V)$  и  $(m-M)_0$  близки к литературным значениям. Металличность используемых изохрон ниже литературных значений, полученных фотометрическим способом, примерно на 0.06-0.16 dex.

### 3.3.1 Определение расстояния до скоплений по светимости вершины ветви красных гигантов

Светимость звезд вершины ветви красных гигантов является одним из наиболее точных индикаторов расстояния до галактик, в которых присутствует старое, бедное металлами звездное население [113].

Авторы статьи Da Costa & Armandroff 1990 [114] калибровали метод определения расстояния с помощью глубокой звездной фотометрии шаровых скоплений Галактики, расстояния до которых были хорошо известны к тому

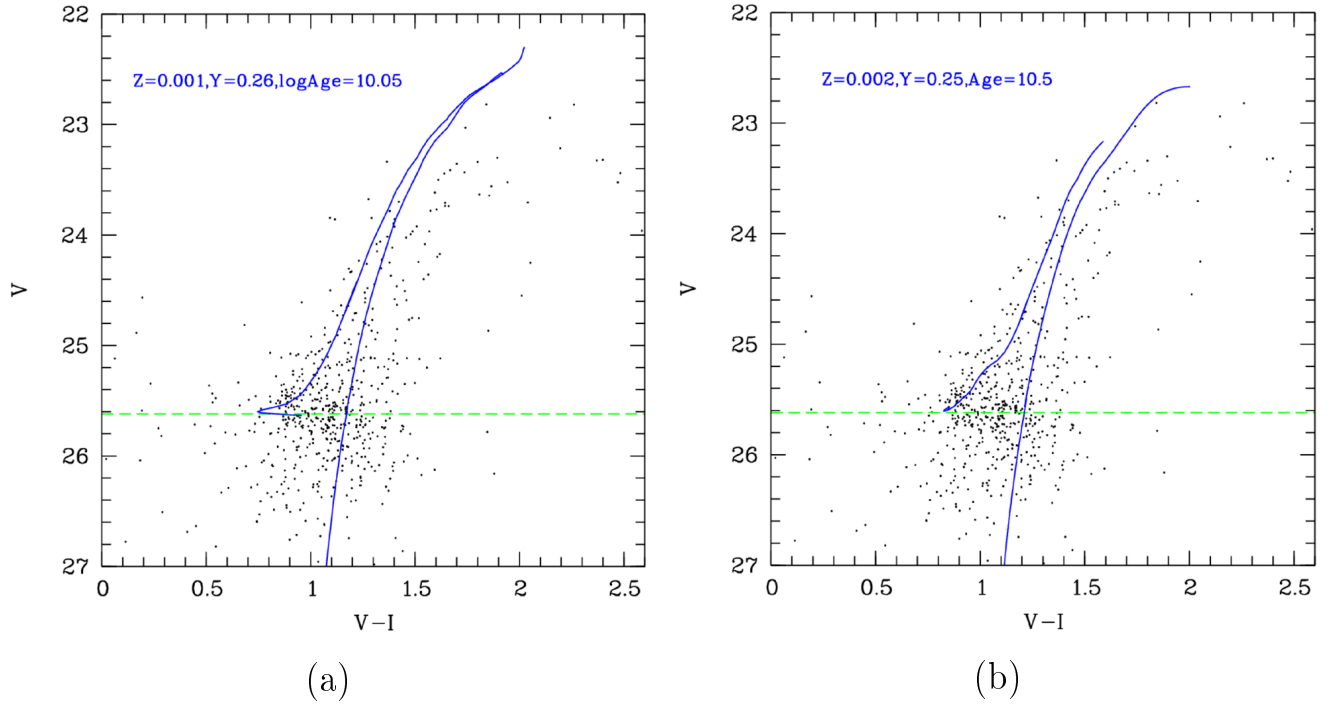


Рисунок 3.7 — (a) — сравнение CMD Vol45 с изохронами B08,  $E(B-V) = 0.16$ ,  $(m-M)_0 = 24.51$ . (b) — сравнение CMD Vol45 с изохронами BASTI,  $E(B-V) = 0.16$ ,  $(m-M)_0 = 24.51$ . Зеленой пунктирной линией на обоих графиках показан уровень  $V_{\text{ГВ}}$  из [88]).

времени. Авторы показали, что светимость вершины ветви красных гигантов (TRGB) в фильтре I фотометрической системы Джонсона-Казинса слабо меняется для звезд с металличностями в диапазоне  $-2.2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.7$  dex и составляет  $M_{I,TRGB} = -4.05^m$ . 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 вершины ветви красных гигантов, а  $A_I$  — поправка за поглощение в фильтре I.

В настоящем исследовании используется метод определения  $m_{I,TRGB}$  из Sakai et al. 1996 [115], 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 асимптотической ветви гигантов. Полученные функции светимости и соответствующие математические фильтры, определяющие вершину ветви красных гигантов, рассчитанные по формулам (A1) и (A2) из Sakai et al. 1996 [115] для Vol6 и Vol45, приведены на рис.15 в работе Maricheva 2021 [108]. С использованием данного метода были получены следующие значения:  $m_{I,TRGB} = 21.0 \pm$

Таблица 13 — Результаты сравнения выбранных (таблицы 11 и 12) изохрон с наблюдаемыми CMD и литературными значениями.

| Об.   | [Fe/H]<br>(dex)  | E(B-V)<br>зв. вел.     | $V_{\text{ГВ}}$<br>зв. вел. | $(m-M)_0$        | Ссылка (метод) |
|-------|------------------|------------------------|-----------------------------|------------------|----------------|
| Vol6  | $-0.71 \pm 0.15$ | $0.08 \pm 0.02$        |                             | $24.57 \pm 0.08$ | ours(HB)       |
|       | $-0.75 \pm 0.1$  | $0.17 \pm 0.08$        |                             | $24.72 \pm 0.26$ | ours(TRGB)     |
|       | $-0.57 \pm 0.15$ | $0.089 \pm 0.02$       | 25.47                       | 24.43            | [111](HB)      |
|       | -0.57            | 0.1                    | 25.46                       | 24.57            | [112](HB)      |
|       | -0.55            | 0.08                   | 25.46                       | 24.56            | [88](HB)       |
| Vol45 | $-1.0 \pm 0.3$   | $0.16 \pm 0.02$        |                             | $24.51 \pm 0.08$ | ours(HB)       |
|       | $-1.1 \pm 0.1$   | $0.16 \pm 0.02$        |                             | $24.59 \pm 0.21$ | ours(TRGB)     |
|       | $-0.94 \pm 0.27$ | $0.12 \pm 0.03^{BH82}$ | 25.55                       | 24.43            | [111](HB)      |
|       | -0.85            | 0.1                    | 25.62                       | 24.55            | [112](HB)      |
|       | -0.9             | 0.16                   | 25.62                       | 24.55            | [88](HB)       |

BH82 – значение избытка цвета E(B-V) для Vol45 из [57]

0.26 для Vol6 и  $m_{I,TRGB} = 20.85 \pm 0.21$  для Vol45. Отсюда следует, что модули расстояния  $(m - M)_0 = 24.72 \pm 0.26$  при  $A_I = 0.17^m$  для Vol6 и  $24.59 \pm 0.21$  для Vol45. Исходя из результатов определения расстояний по светимости вершины ветви красных гигантов, оценена удаленность скоплений от центра М 31:  $R_{M31} = 135$  и  $85$  кпк для Vol6 и Vol45, соответственно.

### 3.4 Сравнение результатов анализа спектров с литературными данными для шаровых скоплений М31 и звезд поля Галактики

В таблице 14 подведен итог настоящего исследования спектров суммарного излучения четырех скоплений в М31 и выполнено сравнение с литературными данными для этих скоплений. На рисунке 3.8 сравнивается полученное содержание [Mg/Fe], [Ca/Fe], [Ti/Fe] и [ $\alpha$ /Fe] с соответствующим содержанием для звезд поля нашей Галактики из работы Venn et al. 2004 [30] и шаровых скоплений в М31 из работы Colucci et al. 2014 [34] (далее С14) (панель (а)) и Sakari et al. 2016 [22] (далее S16) (панель (b)). Как сказано выше, для Vol50 были приняты такие же оценки содержания элементов, как и у Vol45. Содержание элементов  $\alpha$ -процесса, приведенное в таблице 14 и на рисунке 3.8, было вычислено как среднее содержание элементов Mg, Ca и O. Содержание эле-

Таблица 14 — Сравнение полученных значений возраста,  $Y$ ,  $[Fe/H]$  и содержания химических элементов  $[X/Fe]$  с литературными данными.

| Объект        | Bol6       |                   |                   |            |           | Bol45      |                   |            |           | Bol50      |           | Bol20      |           |
|---------------|------------|-------------------|-------------------|------------|-----------|------------|-------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Ref           | Ours       | S16 <sub>IR</sub> | S16 <sub>op</sub> | C14        | Cl11      | Ours       | S16 <sub>IR</sub> | C14        | Cl11      | Ours       | Cl11      | Ours       | Cl11      |
| Age           | 11.2       |                   |                   | 12.5       |           | 11         |                   | 12.5       |           | 11         | 13.5      | 13         | 7.9       |
| (Gyr)         | $\pm 1$    |                   |                   | $\pm 2.5$  |           | $\pm 1$    |                   | $\pm 2.5$  |           | $\pm 1$    | $\pm 2$   | $\pm 1$    | $\pm 2$   |
| $Y$           | 0.3        |                   |                   |            |           | 0.26       |                   |            |           | 0.26       |           | 0.26       |           |
| $[Fe/H]$      | -0.75      | -0.69             | -0.73             | -0.73      | -0.5      | -1.1       | -0.88             | -0.94      | -0.9      | -1.1       | -0.8      | -1.0       | -0.9      |
| (dex)         | $\pm 0.1$  | $\pm 0.05$        | $\pm 0.02$        | $\pm 0.1$  | $\pm 0.1$ | $\pm 0.1$  | $\pm 0.07$        | $\pm 0.1$  | $\pm 0.1$ | $\pm 0.1$  | $\pm 0.1$ | $\pm 0.1$  | $\pm 0.1$ |
| $[C/Fe]$      | 0.1        | -0.32             |                   |            |           | 0.26       | -0.41             |            |           | 0.26       |           | 0.1        |           |
| (dex)         | $\pm 0.15$ | $\pm 0.05$        |                   |            |           | $\pm 0.15$ | $\pm 0.07$        |            |           | $\pm 0.15$ |           | $\pm 0.15$ |           |
| $[N/Fe]$      | 1.45       | 1.35              |                   |            |           | 0.7        | 0.9               |            |           | 0.7        |           | 1.35       |           |
| (dex)         | $\pm 0.2$  | $\pm 0.04$        |                   |            |           | $\pm 0.2$  | $\pm 0.1$         |            |           | $\pm 0.2$  |           | $\pm 0.2$  |           |
| $[Mg/Fe]$     | 0.55       | 0.43              | 0.46              | 0.34       |           | 0.6        | 0.22              | 0.04       |           | 0.6        |           | 0.5        |           |
| (dex)         | $\pm 0.1$  | $\pm 0.05$        | $\pm 0.1$         | $\pm 0.03$ |           | $\pm 0.1$  | $\pm 0.15$        | $\pm 0.15$ |           | $\pm 0.1$  |           | $\pm 0.1$  |           |
| $[Ca/Fe]$     | 0.48       | 0.31              | 0.26              | 0.25       |           | 0.45       | 0.2               | 0.22       |           | 0.45       |           | 0.45       |           |
| (dex)         | $\pm 0.1$  | $\pm 0.07$        | $\pm 0.02$        | $\pm 0.05$ |           | $\pm 0.2$  | $\pm 0.13$        | $\pm 0.04$ |           | $\pm 0.2$  |           | $\pm 0.1$  |           |
| $[Mn/Fe]$     | -0.5       |                   |                   |            |           | -0.4       |                   |            |           | -0.4       |           | -0.55      |           |
| (dex)         | $\pm 0.2$  |                   |                   |            |           | $\pm 0.2$  |                   |            |           | $\pm 0.2$  |           | $\pm 0.2$  |           |
| $[Ti/Fe]$     | 0.15       | 0.43              | 0.17              | 0.2        |           | 0.2        | 0.27              | 0.16       |           | 0.2        |           | 0.2        |           |
| (dex)         | $\pm 0.2$  | $\pm 0.07$        | $\pm 0.05$        | $\pm 0.05$ |           | $\pm 0.2$  | $\pm 0.14$        | $\pm 0.06$ |           | $\pm 0.2$  |           | $\pm 0.2$  |           |
| $[Cr/Fe]$     | 0.0        |                   |                   |            |           | -0.05      |                   |            |           | -0.05      |           | 0.05       |           |
| (dex)         | $\pm 0.2$  |                   |                   |            |           | $\pm 0.2$  |                   |            |           | $\pm 0.2$  |           | $\pm 0.2$  |           |
| $[\alpha/Fe]$ | 0.44       | 0.37              | 0.3               | 0.3        |           | 0.45       | 0.3               | 0.29       |           | 0.45       |           | 0.41       |           |
| (dex)         | $\pm 0.25$ |                   |                   |            |           | $\pm 0.25$ |                   |            |           | $\pm 0.25$ |           | $\pm 0.25$ |           |

Ours – значения, полученные в данной работе;

S16<sub>IR</sub> – [22] по спектрам высокого разрешения в ик-диапазоне;

S16<sub>op</sub> – [22] по спектрам высокого разрешения в оптическом диапазоне;

C14 – [34] по спектрам высокого разрешения в оптическом диапазоне;

Cl11 – [77] по спектрам умеренного разрешения в оптическом диапазоне.

ментов  $\alpha$ -процесса в работах S16 [22] и C14 [34] были вычислены как среднее содержания элементов Ca, Si и Ti и получены методом спектроскопии высокого разрешения. Содержание  $[\alpha/\text{Fe}]$  для звезд поля в работе Venn et al. 2004 [30] определялось как среднее Mg, Ca и Ti.

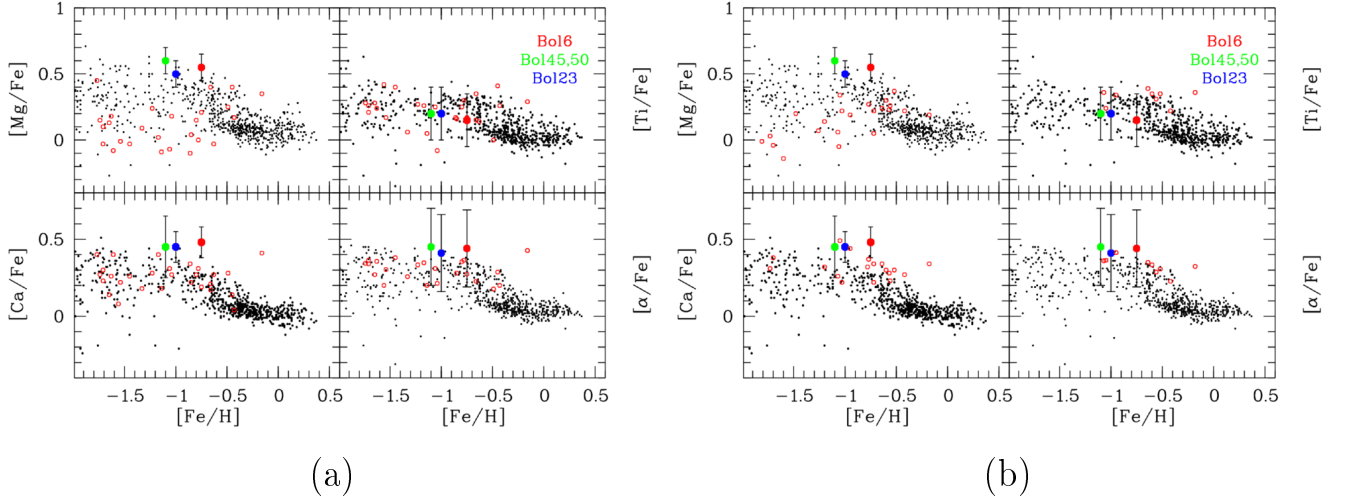


Рисунок 3.8 — (a) – содержание Ca, Mg и Ti и  $[\alpha/\text{Fe}]$ , измеренные для Bol6, Bol20, Bol45 и Bol50 (большие закрашенные кружки), по сравнению с таковыми для звезд поля Галактики из Venn et al. 2004 [30] (черные маленькие точки) и шаровых скоплений в M31 из C14 [34] (красные открытые кружки). (b) – то же, что и на (a), но данные для шаровых скоплений взяты из S16 [22].

Полученное содержание элементов,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и возраст (таблица 14) для Bol6, Bol20, Bol45 и Bol50 согласуются с литературными значениями, найденными методом спектроскопии высокого разрешения (S16 [22], C14 [34]), за исключением  $[\text{C}/\text{Fe}]$ . На рисунке 3.9 (панель (a)) представлены содержания C, N и O шаровых скоплений с металличностью  $-1.1 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.75$  dex из S16 [22] в сравнении с содержанием для выборки четырех скоплений представленной здесь. Значения  $[\text{C}/\text{Fe}]$  в S16 [22] систематически ниже, чем содержание  $[\text{C}/\text{Fe}]$  в четырех шаровых скоплениях выборки (рис. 3.9). Причину расхождения в  $[\text{C}/\text{Fe}]$  объясняют S16 [22]. Они пишут, что использованный спектральный диапазон в инфракрасной полосе H чувствителен в основном только к излучению звезд вершины ветви красных гигантов, для которых характерны пониженные  $[\text{C}/\text{Fe}]$  из-за изменения химического состава в процессе эволюции звезд. Оптические же спектры содержат излучение всех звезд скоплений. Причем излучение звезд ТПП вносит существенный вклад в спектр суммарного излучения ввиду многочисленности этих объектов, согласно функции светимости звезд в скоплении

(о вкладе разных эволюционных стадий звезд в спектр суммарного излучения см в Sharina et al. 2013 [116]).

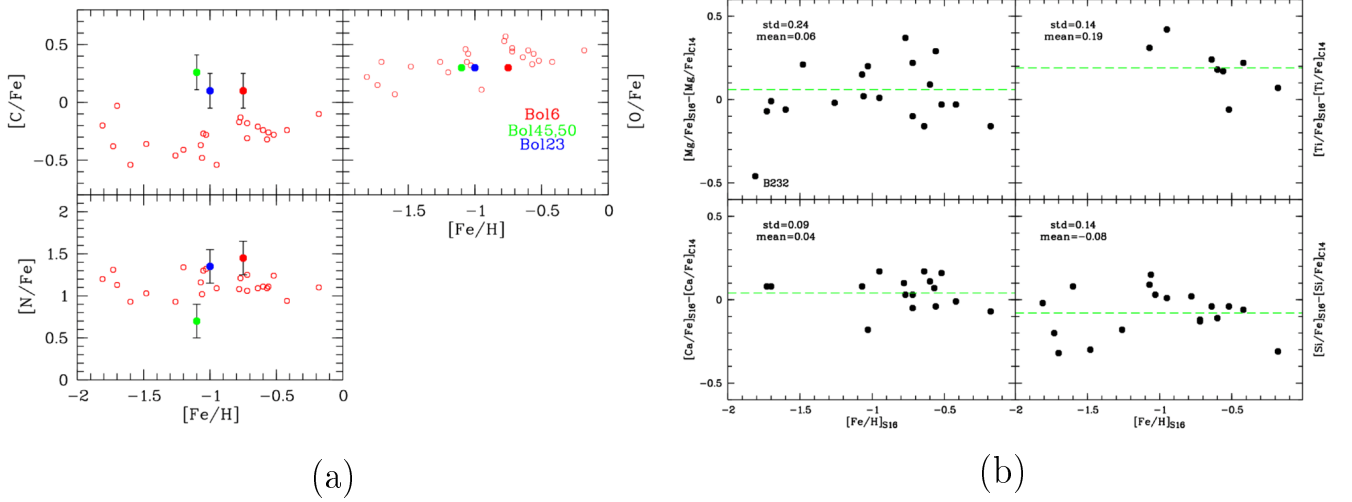


Рисунок 3.9 — (a) – содержание C, N и O, измеренные для Bol 6, Bol 20, Bol 45 и Bol 50 (закрашенные кружки), по сравнению с содержанием оцененным S16 [22]. (b) – сравнение данных S14 [34] и S16 [22] для 19 общих объектов.

Систематические расхождения в содержаниях  $[Mg/Fe]$ ,  $[Ca/Fe]$  и  $[Ti/Fe]$  между полученными здесь и литературными значениями из S16 [22] и S14 [34] (рис. 3.9), полученными в исследованиях интегральных спектров высокого разрешения, можно объяснить различиями в применяемых методиках. Различия в оценках содержаний по спектрам высокого разрешения в литературе были отмечены и в работе Sharina et al. 2020 [24]. На правых панелях рис. 4 в статье [24] видно, что различия между  $[Mg/Fe]$  и  $[Ca/Fe]$  из работ Larsen et al. 2017 [117] и Colucci et al. 2017 [21] для некоторых скоплений достигают 0.3-0.4 dex. На рисунке 3.9 (панель (b)) приводятся различия в содержании Mg, Ca, Ti и Si между данными S16 [22] и S14 [34] для 19 общих объектов в этих двух работах, содержание согласуется в пределах ошибок. Однако объекты в S16 [22], по-видимому, систематически богаче в Ti, особенно при низкой металличности. В спектрах, используемых в анализе четырех объектов, описанных в этой главе, 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 оценивалось содержание, являются доминирующими в спектрах при разрешении FWHM  $\sim 5$  Å. Поэтому вероятность ошибочного определения низка.

Наличие множественных звездных населений в шаровых скоплениях может уменьшить Mg и увеличить удельное содержание гелия Y, содержание N

и Ca ([118] и ссылки в ней). Используя данные, описанные здесь, нельзя однозначно судить о наличии множественных населений в Vol6, Vol20, Vol45 и Vol50. Полученные для этих объектов содержания соответствуют таковым в моделях химической эволюции Галактики под влиянием сверхновых типа II (SNeII) и гиперновых Kobayashi et al. 2006 [119] в диапазоне металличности  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.1$  до  $-0.75$  dex.

Обогащение элементами  $\alpha$ -процесса примерно на 0.2 dex выше в четырех исследуемых скоплениях (см. табл. 14 и рис.3.8), чем в среднем у звезд поля Галактики с  $-1.1 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.75$  dex из работы Venn et al. 2004 [30]. Четыре исследованных в данной главе скопления расположены на расстоянии от центра M31 в проекции на небо  $4.4 < R_{\text{M31}} < 7.3$  кпк. Их металличность ниже, чем средняя металличность красных гигантов гало M31 на данном расстоянии от центра M31 (см. Gilbert et al. 2020 [120] и ссылки в этой статье). Среднее содержание  $\alpha$ -элементов у звезд внутреннего гало M31 ( $[\alpha/\text{Fe}] = 0.45 + 0.09$  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 M31.

Для Vol20 и Vol50 в литературе нет результатов спектроскопии высокого разрешения и, соответственно,  $[\text{X}/\text{Fe}]$  для сравнения. Металличность и возраст, полученные в работе Caldwell et al. 2011 [77] методом измерения в спектрах Ликских индексов и сравнения их с модельными, близки к полученным здесь оценкам для Vol50, но значительно отличаются для Vol20. Необходимо отметить, что применяемый в данной работе метод был протестирован с использованием спектров хорошо изученных шаровых скоплений Галактики (см. Sharina et al. 2020 [24]). Возраст определен с более высокой точностью, чем по методу Ликских индексов (см., например, Caldwell et al. 2011 [77]).

Из работ S16 [22] и C14 [34] были отобраны шаровые скопления в диапазоне металличностей исследуемых здесь четырех шаровых скоплений ( $-1.1 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.75$ ). Каталогные названия из Galletti et al. 2004 [67] этих скоплений следующие: Vol34, Vol48, Vol63, Vol182, Vol235, Vol312, Vol381, Vol383, Vol386 и Vol403. Их возраст, по оценкам C14 [34] и Caldwell & Romanowsky 2016 [121], превышает 10 млрд лет. Близкий возраст был найден для Vol6, Vol20, Vol45 и Vol50. Скопления из статей C14 [34] и S16 [22] распределены в проекции на небо в более широкой области высокой звездной плотности вокруг M31. Два из них



довольно близки к скоплениям выборки: Vol48 и Vol63. Содержание Mg и Ca для Vol63 высокое, согласно S16 [22]:  $[Mg/Fe] = 0.34 \pm 0.08$  dex,  $[Ca/Fe] = 0.49 \pm 0.10$  dex.

### 3.5 Заключение к главе 3

В главе представлены результаты анализа спектров суммарного излучения четырех ярких шаровых скоплений M31 в проекционной близости к NGC205. Общей особенностью четырех скоплений выборки является средняя металличность  $[Fe/H]$   $[-1.1; -0.75]$  dex и большой возраст 11-14 млрд лет. В данной работе впервые определены содержания элементов C, N, O, Mg, Ca, Mn, Ti и Sr для шаровых скоплений Vol 50 и Vol 20. Химический состав для двух других исследованных нами скоплений в M31 – Vol 6 и Vol 45 – в целом согласуется в пределах ошибок содержания с литературными значениями, полученными методом спектроскопии высокого разрешения. Для всех четырех объектов впервые определено удельное содержание гелия Y. Было выполнено сравнение полученного содержания с таковым у шаровых скоплений M31 и звезд поля Галактики. Содержание  $[C/Fe]$  исследуемых скоплений выше соответствующих значений из S16, что связано с изменением химического состава звездных атмосфер в ходе их эволюции. Было установлено, что объекты исследования имеют более высокое содержание  $\alpha$ -элементов при их металличности, чем большинство шаровых скоплений и звезд поля в M31 и нашей Галактике. Полученные значения  $[\alpha/Fe]$  у четырех объектов соответствуют среднему значению  $[\alpha/Fe]$  звезд внутреннего гало ( $[\alpha/Fe] = 0.45 \pm 0.09$  dex [120]) на данном расстоянии от центра M31. Металличность исследуемых объектов ниже, чем средняя металличность красных гигантов гало M31 [120].

Выполнен анализ CMD скоплений Vol6, Vol45, построенных по данным звездной фотометрии из [88]. Из сравнения используемых при анализе спектров изохрон с наблюдаемыми CMD получены следующие модули расстояния и избытки цвета для Vol6 и Vol45 соответственно:  $(m-M)_0 = 24.57 \pm 0.08$ ,  $24.51 \pm 0.08$  и  $E(B-V) = 0.08^m \pm 0.02$ ,  $0.16^m \pm 0.02$ . Эти значения находятся в согласии с литературными данными.

Объекты исследования расположены в проекции на небесную сферу между М31 и ее спутником – карликовой эллиптической галактикой NGC205. Согласно Caldwell et al. 2016 [100], скопления средней металличности ( $-1.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.4 \text{ dex}$ ), к которым относятся и объекты исследования, распределены в широкой области до расстояний  $R_{\text{M31}} \sim 30 \text{ кпк}$  и показывают в среднем слабое вращение в направлении вращения диска М31. Для этих объектов характерна высокая степень концентрации к центру М31 и существенный разброс по лучевым скоростям относительно скорости М31. Только Vol 6 показывает лучевую скорость, близкую к системной скорости NGC205. Sharina et al. 2006 [86] определили возраст, металличность и  $[\alpha/\text{Fe}]$  для пяти скоплений в NGC205 по данным Ликских индексов. Металличность скоплений находится в интервале от  $[\text{Z}/\text{H}] \sim -0.6$  до  $-1.3 \text{ dex}$ , в который попадают и четыре исследуемых скопления. Однако диапазон по возрастам у скоплений в NGC205 большой: от 4 до 11 млрд лет. Отсюда следует, что из полученных в представленном здесь исследовании данных сложно судить о принадлежности исследуемых скоплений NGC205.

## Глава 4. Свойства звездных населений восьми шаровых скоплений Галактики низкой поверхностной яркости

### 4.1 Постановка задачи

В данной главе обсуждаются результаты исследования спектров суммарного излучения восьми шаровых скоплений Галактики с относительно низкой светимостью и звездной плотностью. Их видимая центральная поверхностная яркость слабее  $21.3 \text{ m/s}^2$  в фильтре V системы Джонсона-Казинса. Цель исследования – определение их возраста, металличности и примерного содержания элементов  $\alpha$ -процесса. Результаты были представлены в работе Sharina & Maricheva 2021 [122]. В работе используется метод измерения Ликских абсорбционных индексов и сравнения полученных значений с модельными, а также сравнение с имеющимися в литературе Ликскими индексами для ярких хорошо изученных шаровых скоплений Галактики. Таким образом, могут быть найдены аналоги исследуемых объектов – скопления с похожими свойствами звездных населений.

Основные наблюдательные свойства исследуемых скоплений и ярких скоплений-аналогов со сходными значениями, измеренных в их спектрах, Ликских индексов приводятся в таблице 15. Часть объектов исследования находится на большом расстоянии от Солнца (Pal 1, Pal 2, Pal 14, NGC 6426, Pal 13), а другая расположена в зоне поглощения света пылью вблизи плоскости Галактики (Pal 2, NGC 6426, NGC 6535, NGC 6749, Pal 10). Для последних показатель поглощения  $E(B-V) > 0.3^m$ . Общее свойство исследуемых объектов – низкая центральная плотность звезд. Это относительно малоизученные скопления, для которых до этой работы не было исследования спектров суммарного излучения. Не было таких работ и впоследствии. Получение и исследование спектров высокого разрешения отдельных ярчайших звезд в таких скоплениях осложнено малой яркостью звезд. Поэтому такие спектры были получены в литературе лишь для малого числа звезд в скоплениях. Объекты со спектрами высокого разрешения (см. ссылки в табл. 17, 18): 1) Pal 1 (число исследованных звезд к 2021 году  $N = 8$ ), 2) Pal 14 ( $N = 9$ ), 3) NGC 6426 ( $N = 4$ ), 4) NGC 6535 ( $N =$

Таблица 15 — Литературные характеристики выборки восьми скоплений Галактики.

| Имя     | RA(2000) |    | DEC(2000) |     | E(B−V) | Dist | M <sub>v</sub> | V <sub>h</sub> | [Fe/H]             |          |       |
|---------|----------|----|-----------|-----|--------|------|----------------|----------------|--------------------|----------|-------|
|         | hh       | mm | ss        | gr  |        |      |                |                |                    | mm       | ss    |
| Pal 1   | 03       | 33 | 23.0      | +79 | 34     | 50   | 0.15           | 10.9           | -2.47              | -83±3.3  | -0.60 |
| Pal 2   | 04       | 46 | 05.9      | +31 | 22     | 51   | 1.24           | 27.6           | -5.14              | -133±57  | -1.30 |
| Pal 14  | 16       | 11 | 00.6      | +14 | 57     | 28   | 0.04           | 76.5           | -4.95 <sup>S</sup> | 77±2.2   | -1.62 |
| NGC6426 | 17       | 44 | 54.7      | +03 | 10     | 13   | 0.36           | 20.6           | -6.69              | -162±23  | -2.15 |
| NGC6535 | 18       | 03 | 50.5      | -00 | 17     | 52   | 0.34           | 6.8            | -4.75              | -215±0.5 | -1.79 |
| NGC6749 | 19       | 05 | 15.3      | +01 | 54     | 03   | 1.50           | 7.9            | -6.70              | -62±2.9  | -1.60 |
| Pal 10  | 19       | 18 | 02.1      | +18 | 34     | 18   | 1.66           | 5.9            | -5.79              | -32±0.4  | -0.10 |
| Pal 13  | 23       | 06 | 44.4      | +12 | 46     | 19   | 0.05           | 26.0           | -2.80 <sup>B</sup> | 24±0.5   | -1.88 |
| NGC2419 | 07       | 38 | 08.5      | +38 | 52     | 55   | 0.11           | 84.2           | -9.58              | -20±0.8  | -2.12 |
| NGC6205 | 16       | 41 | 41.5      | +36 | 27     | 37   | 0.02           | 7.7            | -8.70              | -246±0.3 | -1.54 |
| NGC6229 | 16       | 46 | 58.9      | +47 | 31     | 40   | 0.01           | 30.4           | -8.05              | -154±7.6 | -1.43 |
| NGC6341 | 17       | 17 | 07.3      | +43 | 08     | 11   | 0.02           | 8.2            | -8.20              | -120±0.1 | -2.28 |
| NGC6779 | 19       | 16 | 35.5      | +30 | 11     | 05   | 0.20           | 10.1           | -7.38              | -136±0.8 | -1.94 |
| NGC7006 | 21       | 01 | 29.5      | +16 | 11     | 15   | 0.05           | 41.5           | -7.68              | -370±1.4 | -1.63 |
| NGC7078 | 21       | 29 | 58.3      | +12 | 10     | 01   | 0.10           | 10.3           | -9.17              | -107±0.2 | -2.26 |

Данные таблицы взяты в основном из каталога Харриса [75]. Для Pal14 некоторые данные взяты из Sollima et al. 2011 [123] (отмечено надстрочным индексом<sup>S</sup>); для Pal13 – из Bradford et al. 2011 [124] (индекс<sup>B</sup>).

7) и 5) Pal 13 (N = 18). Спектры низкого разрешения отдельных звезд были получены и исследованы в литературе (см. ссылки в табл. 17, 18) для: 1) Pal 14 (N = 6), 2) NGC 6426 (N = 5), 3) NGC 6535 (N = 2), 4) NGC 6749 (N = 4) и 5) Pal 10 (N = 4). Исследования CMD таких скоплений осложнены удаленностью объектов от нас, т.е. ТПП обычно не видна, и (или) ослаблением света пылью вблизи плоскости Галактики и засоренностью CMD большим числом фоновых звезд. В данной работе исследуются CMD для Pal 10 и NGC 6426. Среди объектов исследования в литературе имелись к 2021 исследования CMD (см. ссылки в табл. 17, 18) только для Pal 2, Pal 13, Pal 14 и NGC 6535. Таким образом, выполненная работа дополняет литературные данные.

## 4.2 Наблюдательные данные и анализ полученных спектров

Материалом для работы послужили архивные наблюдательные данные 1.93-м телескопа обсерватории Верхнего Прованса (ОHP). Наблюдения проводились с помощью спектрографа CARELEC [125]. Использовалась решетка 300 штр./мм со следующими характеристиками: дисперсия  $\sim 1.78 \text{ \AA}/\text{пиксель}$ , разрешением  $R = 900$  ( $\text{FWHM} \sim 5.5 \text{ \AA}$ ) и спектральный диапазон 3700-6800  $\text{ \AA}$ . Размеры длинной щели составляли ( $5.5' \times 2''$ ). Наблюдались также звезды из списка Worthey [58] для перевода измерений абсорбционных индексов в спектрах скоплений в стандартную Ликскую систему и контроля измерений лучевых скоростей шаровых скоплений. Журналы наблюдений шаровых скоплений представлен таблице 16. Журнал наблюдений стандартных звезд представлен в таблице 3 в работе Sharina & Maricheva 2021 [122]. Редукция длиннощелевых спектров выполнялась аналогичным способом описанным в разделе 2.2.

Способы ориентирования щели спектрографа при спектральных наблюдениях каждого скопления представлены на ftp-сайте САО<sup>1</sup>, согласно номерам позиций в таблице 16. Спектральные наблюдения проводились согласно заранее подготовленным центрам и позиционным углам щели спектрографа в соответствии с координатами звезд – предположительных членов скоплений. Звезды были предварительно отобраны по их звездным величинам и положению на CMD. Для всех восьми исследуемых скоплений, кроме Pal 10, использовались следующие литературные сведения. Это данные фотометрии на снимках HST Sarajedini et al. 2007 [110] в фильтрах и широкополосной системы Джонсона-Казинса для Pal 1, Pal 2, NGC 6535, фотометрии Hilker et al. 2006 [126] для Pal 14 в фильтрах B и V той же системы, Bradford et al. 2011 [124] для Pal 13 в фильтрах g и r фотометрической системы Канадо-Франко-Гавайского телескопа (CFHT), а также звездные величины из 2MASS (Two Micron All-Sky Survey)<sup>2</sup> в широкополосных инфракрасных фильтрах, центрированных на длины волн 1.25 мкм (J), 1.65 мкм (H) и 2.15 мкм (Ks). Для Pal 10 мы выполнили фотометрию звезд с использованием прямых снимков из архива VLT (Very Large

<sup>1</sup><ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/LickIndOHP/PosSlit/>

<sup>2</sup><https://www.ipac.caltech.edu/2mass/>

Таблица 16 — Журнал спектральных наблюдений шаровых скоплений со спектрографом CARELEC

| Объект               | Дата                | $t_{exp}$<br>сек. | Позиция<br>щели | FWHM<br>угл. сек. |
|----------------------|---------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Pal 1<br>(S/N~60)    | 01.12.08            | 2x1200            | 1               | 3.5               |
|                      |                     | 3x1200            | 2               |                   |
|                      | 02.12.08            | 2x1200            | 1               |                   |
|                      |                     | 4x1200            | 3               |                   |
| Pal 2<br>(S/N~70)    | 01.12.08            | 3x1200            | 1               | 3.5               |
|                      |                     | 3x1200            | 2               | 3.5               |
|                      | 02.12.08            | 4x1200            | 3               |                   |
|                      |                     | 03.12.08          | 2x1800          | 2                 |
|                      |                     |                   | 2x1800          | 2(shift)          |
| Pal 14<br>(S/N~40)   | 07.07.10            | 5x1200            | 4               | 2.5               |
|                      | 08.07.10            | 4x1200            | 5               | 2.5               |
|                      | 10.07.10            | 1200              | 4               | 2.5               |
|                      | 11.07.10            | 1200              | 4(f1)           | 2.5               |
|                      | 11.07.10            | 2x1200            | 4(f2)           | 2.5               |
|                      | 11.07.10            | 1200              | 2(f1)           | 2.5               |
|                      | NGC6426<br>(S/N~60) | 10.07.10          | 2x1200          | 2                 |
| 600                  |                     |                   | 4               | 3.5               |
| NGC6535<br>(S/N~100) | 12.07.10            | 3x1200            | 0               | 3.5               |
| NGC6749<br>(S/N~65)  | 11.07.10            | 1200              | 1               | 3                 |
|                      | 12.07.10            | 1200              | 1               | 3                 |
|                      |                     | 1200              | 6               | 3                 |
| Pal 10<br>(S/N~45)   | 07.07.10            | 3x1200            | 1               | 3                 |
|                      |                     | 2x1200            | 3               | 2.5               |
|                      | 08.07.10            | 2x1200            | 3               | 2.5               |
|                      | 10.07.10            | 2x1200            | 5               | 3.5               |
|                      | 11.07.10            | 2x1200            | 4               | 3.5               |
|                      | 11.07.10            | 1800,1200         | 4(shift)        | 3.5               |
| Pal 13<br>(S/N~45)   | 01.12.08            | 2x900             | 1               | 3.5               |
|                      |                     | 1800              | 1               | 3.5               |
|                      |                     | 3x1200            | 2               | 3.5               |
|                      | 02.12.08            | 2x1200            | 1               | 3.5               |
|                      |                     | 4x1200            | 3               | 3.5               |

Telescope), которая обсуждается в разделе 4.4 (см. также Sharina & Maricheva 2021 [122] разделы 3.1, 4.1).

Для более качественного отбора звезд и групп звезд, входящих в скопления, по спектрам с умеренным разрешением определялись лучевые скорости и приблизительные параметры: эффективные температуры  $T_{eff}$ , ускорение силы тяжести на поверхности звезд  $\log(g)$  и металличность  $[Fe/H]$  с помощью программы ULySS [25], [26] и спектральной звездной библиотеки ELODIE [84]. Из анализа же результатов фотометрии звезд, входящих в скопления, в разных фотометрических фильтрах в оптической и инфракрасной областях длин волн, определялись с помощью калибровочных соотношений из Alonso et al. 1999 [127] и Ramirez et al. 2005 [128]. Данные об атмосферных параметрах отдельных звезд и групп звезд в скоплениях содержатся на ftp-сайте CAO<sup>3</sup>.

С помощью полученных спектров суммарного излучения определялись возраст, металличность и примерное содержание  $\alpha$ -элементов скоплений путем сравнения измеренных абсорбционных индексов в Ликской системе<sup>4</sup> [57–59; 125; 129] с соответствующими модельными индексами Thomas et al. 2003, 2004 [37; 38] (см. раздел 1.2), а также попиксельного сравнения наблюдаемых спектров с модельными и спектрами суммарного излучения ярких шаровых скоплений Галактики. Последняя задача решалась с помощью программы ULySS [25; 26] с набором модельных спектров PEGASE.HR [83] с библиотекой звездных спектров ELODIE [84; 130], а также с набором модельных спектров из работы Vazdekis et al. 2010 [27], использующей библиотеку звездных спектров Miles [131]. Рисунки сравнения наблюдаемых и модельных спектров даны на ftp сайте CAO<sup>5</sup>. Для NGC6535, спектр которого получился с высоким отношением сигнал/шум  $S/N \sim 100$  на длине волны  $5000\text{\AA}$ , для анализа спектра применялся метод популяционного синтеза, описанный в разделе 1.1.

Ликская система создана на основе индексов, измеренных в спектрах звезд, так называемых Ликских стандартов<sup>6</sup> [58]. Для приведения результатов измерения абсорбционных индексов в стандартную Ликскую систему наблюдались некоторые из этих объектов (см. табл. 3 в работе Sharina & Maricheva 2021 [122]) и строили зависимости между инструментальными и стандартными

<sup>3</sup><ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/LickIndOHP/AtmPar/>

<sup>4</sup><http://astro.wsu.edu/worthey/html/system.html>

<sup>5</sup><ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/LickIndOHP/SpComp/>

<sup>6</sup><http://astro.wsu.edu/ftp/W097/export.dat>

индексами. Коэффициенты таких зависимостей для наблюдений 2010 г. представлены в табл. 5 работы Sharina & Maricheva 2021 [122]. Ошибки индексов складываются из ошибок их измерения и ошибок перевода измерений в стандартную Ликскую систему.

### 4.3 Результаты определения возраста, $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $[\alpha/\text{Fe}]$ и сравнение с литературными данными

В таблицах 6 и 7 работы Sharina & Maricheva 2021 [122] приведены результаты измерения Ликских индексов в спектрах суммарного излучения скоплений исследования, переведенные в стандартную систему. В этом разделе приводятся диагностические диаграммы на рисунках 4.1, 4.2 и 4.3, которые показывают сравнение Ликских индексов, измеренных в спектрах исследуемых шаровых скоплений, с модельными Thomas et al. 2003, 2004 [37; 38] и со значениями индексов для ярких шаровых скоплений Галактики. Модели простых звездных населений [37; 38] содержат значения Ликских индексов, рассчитанные для разного возраста, металличности и  $[\alpha/\text{Fe}]$ .

Диагностические диаграммы «возраст-металличность» показаны на рисунках 4.1 и 4.2 (верхняя левая панель). Вдоль вертикальной оси на них наложены индексы водородных линий в Ликской системе, изменение значений которых зависит от изменения возраста. Вдоль горизонтальной оси отложены значения  $[\text{MgFe}]' = \sqrt{\text{Mgb} \cdot (0.72\text{Fe}5270 + 0.28\text{Fe}5335)}$ , рассчитанные с использованием Ликских индексов, чувствительных к изменению содержаний Fe и Mg<sup>7</sup>. На диагностических диаграммах «металличность-содержание  $\alpha$ -элементов» (остальные панели рис. 4.2) вдоль одной из осей отложены индексы, чувствительные к содержанию железа ( $[\text{MgFe}]'$  или  $\langle \text{Fe} \rangle = (\text{Fe}5270 + \text{Fe}5335)/2$ ). Вдоль другой оси приведены индексы, центрированные на линии  $\alpha$ -элементов: Ca4227, Mgb и Mg. Диагностические диаграммы «металличность-содержание элементов C и N» (рис. 4.3) показывают значения индекса  $[\text{MgFe}]'$  в зависимости от индексов, центрированных на молекулярные полосы CN, CH и C<sub>2</sub> соответственно: CN1, CN2, G4300 и Fe4668=C<sub>2</sub>4668. Рассмотрение диагностических диаграмм

<sup>7</sup>То есть участки спектра, в пределах которых измеряются индексы, содержат линии Fe и Mg, сильно меняющие интенсивность при изменении содержаний этих элементов.



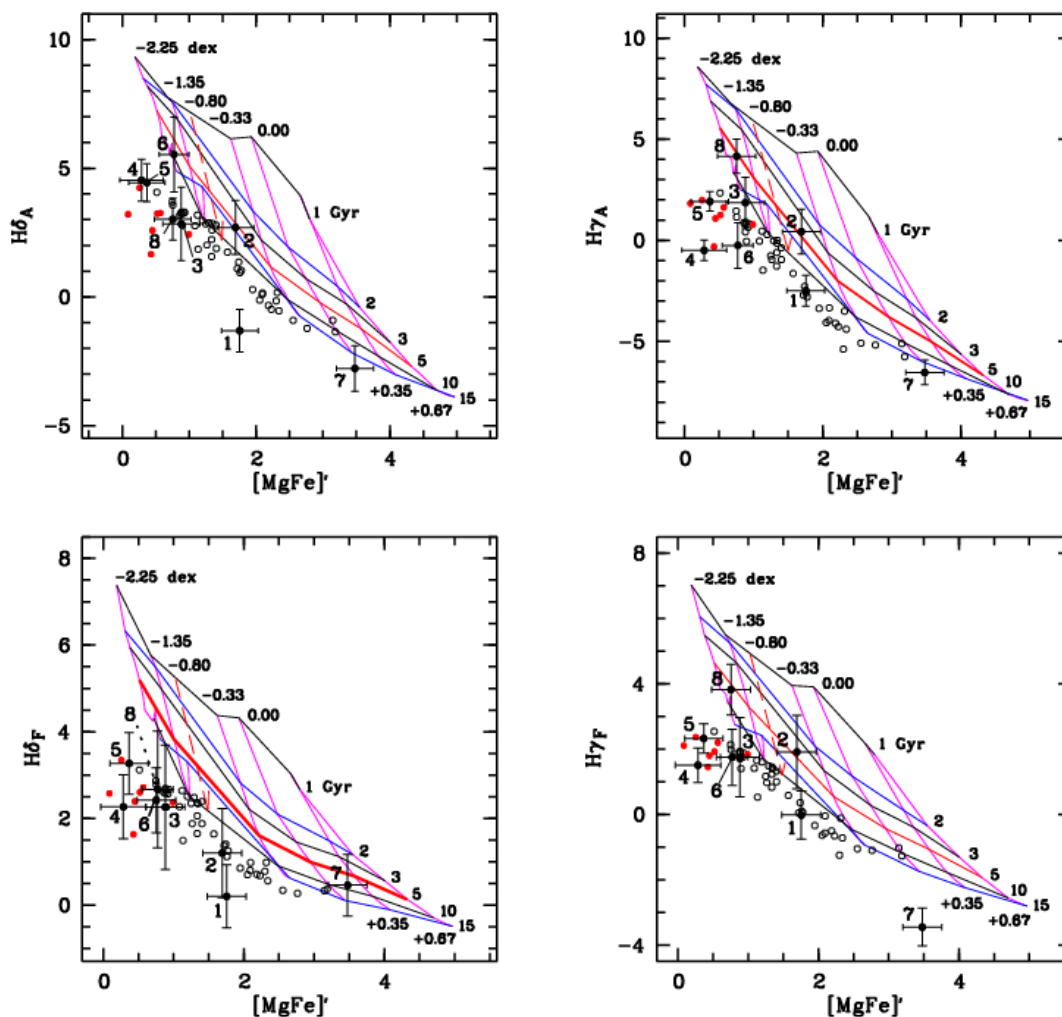


Рисунок 4.1 — Диагностические диаграммы «возраст-металличность» (см. подробное объяснение в разделе 4.3). Значения возраста подписаны справа, металличности – сверху. Открытыми кружками отмечены индексы скоплений Галактики из статьи Schiavon et al. 2012 [60], красными точками – индексы скоплений-аналогов (нижняя часть табл. 15), черными точками с барами ошибок – исследуемые объекты. Значения индексов даны в работе Sharina & Maricheva 2021 [122] (табл. 6 и 7).

с разными индексами позволяет более точно оценить возраст, металличность и  $[\alpha/\text{Fe}]$  объектов и определить степень искажения результатов ошибками измерения индексов.

Полученные в данной работе возраст и металличность скоплений приведены в таблицах 17, 18. Здесь также суммированы сведения из литературы для восьми объектов исследования и скоплений сравнения. Столбцы таблицы содержат следующие данные: (1) имя скопления; (2) возраст в млрд лет; (3) отношение индексов  $H_{\delta F}/H_{\beta}$ , являющееся, согласно Schiavon et al. 2004 [65], индикатором

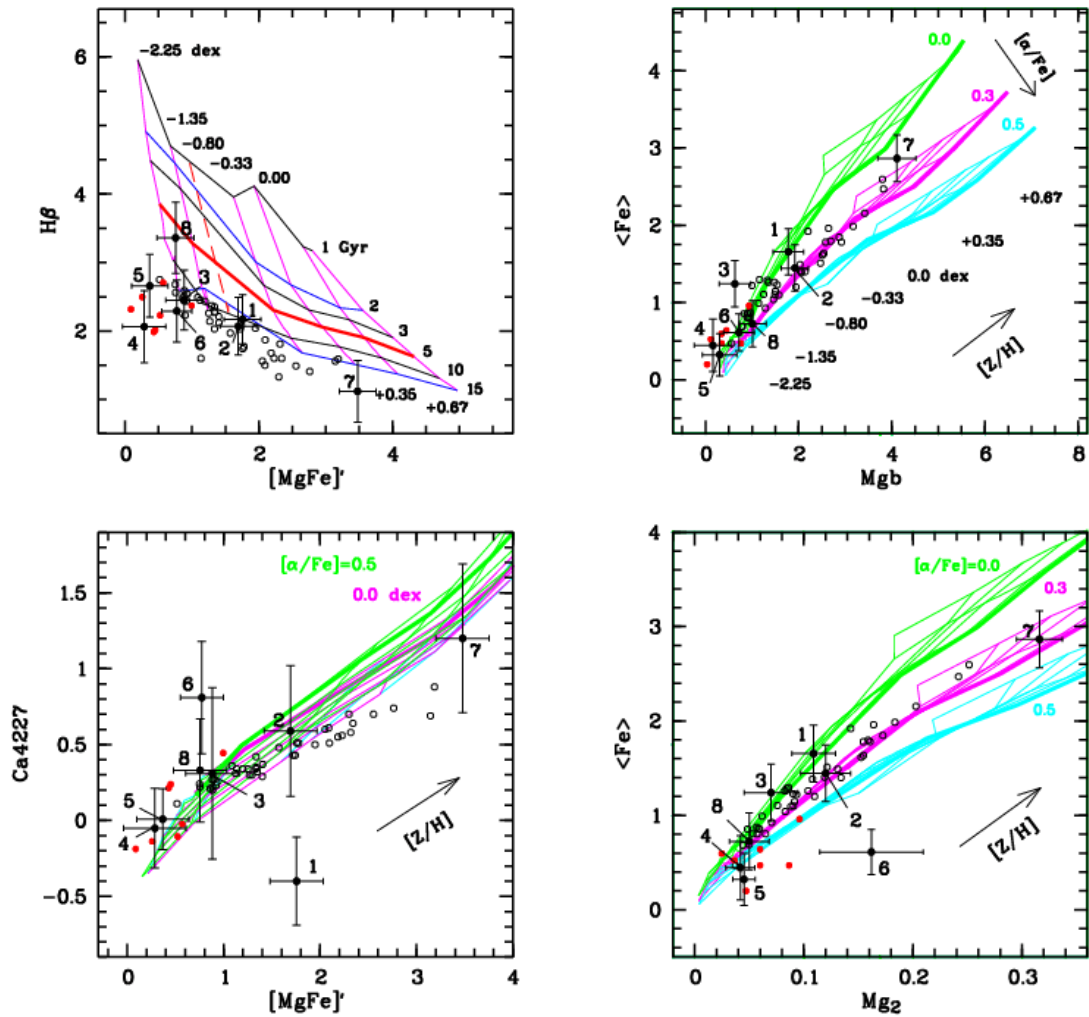


Рисунок 4.2 — Диагностические диаграммы «возраст-металличность» (верхняя левая панель) и «металличность  $[Z/H]$ -содержание  $\alpha$ -элементов» (остальные панели). Индексы скоплений показаны такими же символами, как на предыдущем рисунке. На диаграммах  $[Z/H]$ - $[\alpha/Fe]$  показаны значения  $[Z/H]$  и/или направление изменения металличности. Разными цветами приведены модельные зависимости для разных  $[\alpha/Fe]$ . Подробное объяснение к панелям дано в разделе 4.3.

ром относительного количества звезд в разных частях ГВ<sup>8</sup>; (4) металличность  $[Fe/H]$ , dex; (5-8) содержание элементов C, Mg, Ca в dex и среднее содержание  $\alpha$ -элементов в dex (надстрочный индекс<sup>0</sup> означает, что значение было вычислено в работе Sharina & Maricheva 2021 [122] (описанной здесь) по результатам литературных исследований); (9) метод исследования возраста и содержания элементов (IL – исследование спектров суммарного излучения скоплений, LR – исследование спектров среднего разрешения отдельных звезд объектов, HR –

<sup>8</sup>Согласно Schiavon et al. 2004 [65],  $H_{\delta_F}/H_{\beta} \geq 1.05$  у шаровых скоплений с голубой ГВ ( $HBR = (B-R)/(B+V+R) \sim 1$ ), а  $H_{\delta_F}/H_{\beta} \leq 0.85$  у объектов с красной ГВ ( $HBR = (B-R)/(B+V+R) \sim -1$ ). Промежуточные значения  $H_{\delta_F}/H_{\beta}$  присущи, соответственно, скоплениям с примерно равным числом звезд в красной и голубой частях ГВ.

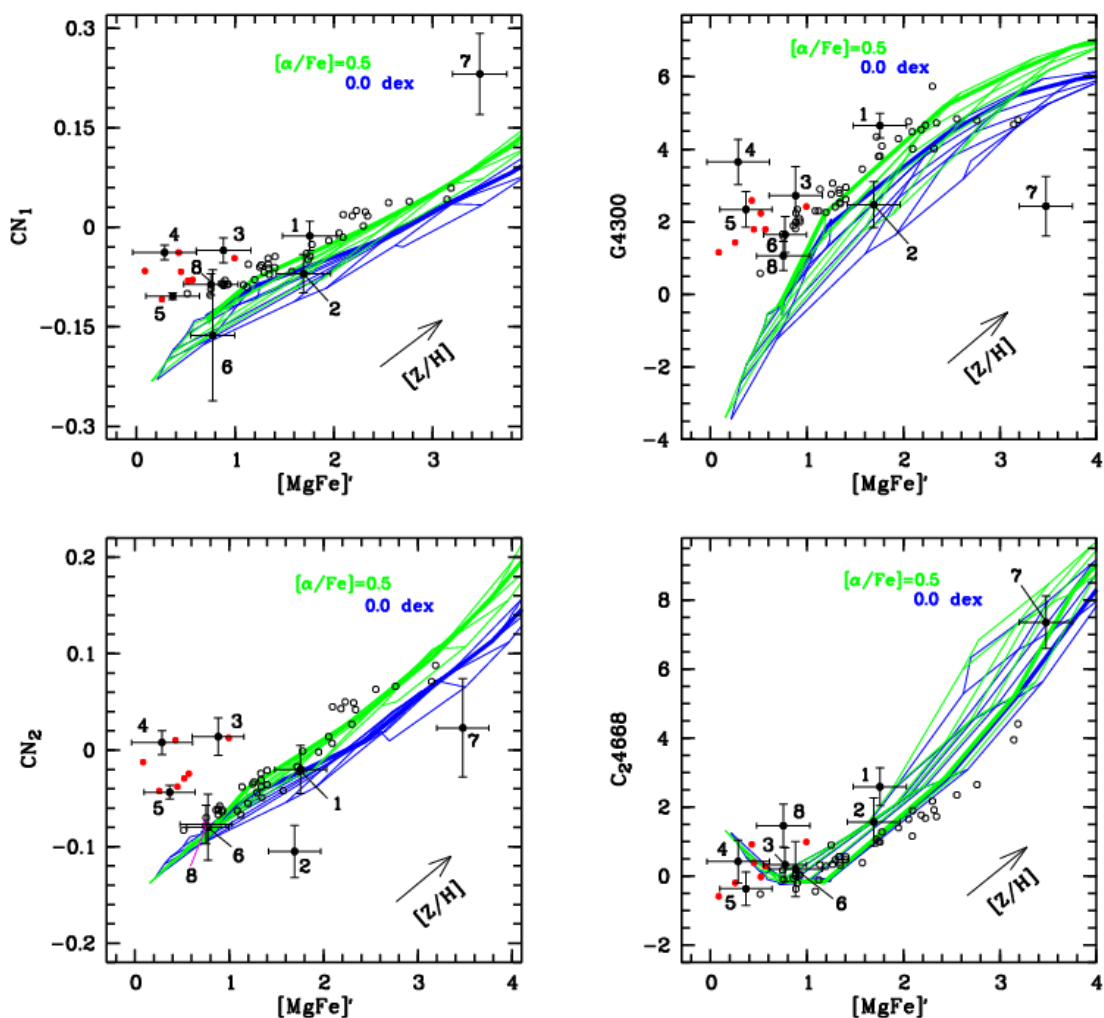


Рисунок 4.3 — Диагностические диаграммы «металличность-индексы, чувствительные к содержаниям C и N». Индексы скоплений показаны такими же символами, как на рисунке 4.1. Подробное объяснение к панелям дано в разделе 4.3.

спектроскопия высокого разрешения звезд скоплений, CMD – исследование диаграмм «цвет-звездная величина», REF – работа, суммирующая литературные данные спектроскопии высокого разрешения звезд скоплений); (10) источник литературных данных. В случае если наблюдались отдельные звезды скоплений, в столбце 10 в скобках указано количество звезд. Полученные в работе [122] (описанная здесь)  $[\alpha/Fe]$  для всех скоплений, кроме NGC6535, приближены и приведены в таблице без соответствующих ошибок.

Скопления сравнения были отобраны исходя из сходства их Ликских индексов с таковыми у объектов исследования. Ликские индексы были измерены в работе Sharina & Maricheva 2021 [122] или взяты из работы Schiavon et al. 2012 [60]. Скопления-аналоги удалось уверенно подобрать для всех скоплений с низкой поверхностной яркостью, кроме Pal1. Как видно из таблиц 17, 18 (и табл.

Таблица 17 — Полученные в данной работе (индекс <sup>0</sup> означает, что значение было вычислено в настоящей работе по результатам литературных исследований) и литературные сведения об объектах исследования (выделены жирным шрифтом) и литературные данные для скоплений сравнения со сходными Ликскими индексами.

| Об.          | Возраст    | $H_{\delta_F}/H_{\beta}$ | [Fe/H]         | [C/Fe] | [Mg/Fe]      | [Ca/Fe]      | $[\alpha/Fe]$     | Метод | Ref                |
|--------------|------------|--------------------------|----------------|--------|--------------|--------------|-------------------|-------|--------------------|
| <b>Pal1</b>  | 8–10       | 0.09                     | $-0.8 \pm 0.2$ |        |              |              | 0.0               | IL    | [122] <sup>0</sup> |
|              |            |                          | -0.6           | -0.25  | -0.10        | 0.20         | 0.1               | HR    | [132] (2)          |
|              |            |                          | -0.6           |        | -0.06        | 0.10         | -0.05             | HR    | [133] (5)          |
|              |            |                          | -0.5           |        | 0.11         | 0.04         | 0.08 <sup>0</sup> | HR    | [134] (1)          |
| N6304        | 12.3       | 0.23 <sup>S</sup>        | -0.48          |        |              |              | 0.20              | CMD   | [135]              |
|              | 11.25      |                          | -0.37          |        |              |              |                   | CMD   | [136]              |
| N6624        | 12.5±0.9   | 0.42 <sup>S</sup>        | -0.44          | -0.29  | 0.42±0.05    | 0.40         | 0.41 <sup>0</sup> | Ref   | [94]               |
|              | 13.18      |                          | -0.77          | -0.15  | 0.36         | 0.23         | 0.30 <sup>0</sup> | IL    | [98]               |
|              |            |                          | -0.69          |        | 0.42         | 0.40         | 0.39              | HR    | [137] (5)          |
|              | 11.25      |                          | -0.42          |        |              |              |                   | CMD   | [136]              |
| <b>Pal2</b>  | 12±2       | 0.99                     | -1.5           |        |              |              | 0.3               | IL    | [122] <sup>0</sup> |
|              | 13.25      |                          | [-1.9, -1.6]   |        |              |              | [0,0.4]           | CMD   | [138]              |
| N7006        | 13.6±1     | 0.82                     | -1.8±0.1       | -0.07  | 0.27±0.15    | 0.2±0.1      | 0.24 <sup>0</sup> | IL    | [24]               |
|              |            |                          | -1.69          |        | 0.42         |              | 0.25              | LR    | [139] (5)          |
|              |            |                          | -1.55          |        | 0.36         | 0.23         | 0.23              | Ref   | [140]              |
|              |            |                          | -1.55          |        | 0.36         | 0.23         |                   | Ref   | [141]              |
| <b>Pal14</b> | 12±1       | 0.92                     | -1.3±0.2       |        |              |              | 0.0               | IL    | [122] <sup>0</sup> |
|              |            |                          | -1.44          |        | 0.37         | 0.29         | 0.34              | HR    | [142] (9)          |
|              |            |                          | -1.22          |        | 0.32         |              | 0.24              | LR    | [139] (6)          |
|              |            |                          | -1.34          |        | 0.37         | 0.29±0.24    |                   | Ref   | [141]              |
| N6229        | 12.6±1     | 1.00                     | -1.65          | -0.05  | 0.15         | 0.4±0.15     | 0.28              | IL    | [143]              |
|              |            |                          | -1.13          |        | [0.05, 0.34] | [0.06, 0.34] | 0.2 <sup>0</sup>  | HR    | [144] (11)         |
| <b>N6426</b> | 13.6±2     | 1.10                     | -2.15          |        |              |              | 0.3               | IL    | [122] <sup>0</sup> |
|              |            |                          | -2.34          |        | 0.44±0.05    | 0.25         | 0.39              | HR    | [145] (4)          |
|              |            |                          | -2.39          |        | 0.38         |              | 0.24              | LR    | [139] (5)          |
| N7078        | 13.6±1     | 1.00                     | -2.35          | -0.15  | 0.23         | 0.15         | 0.19 <sup>0</sup> | IL    | [92]               |
|              |            |                          | -2.23          |        | 0.41         |              | 0.24              | LR    | [139] (15)         |
|              | 12.9±0.5   |                          | -2.39          | -0.30  | 0.36         | 0.31         | 0.34              | Ref   | [94]               |
|              |            |                          | -2.28          | -0.41  | 0.11         | 0.16         | 0.14 <sup>0</sup> | HR    | [146] (23)         |
|              |            |                          | -2.38          |        | 0.28         | 0.27         | 0.34              | Ref   | [140]              |
|              | 12.75±0.25 |                          | -2.33          |        |              |              |                   | CMD   | [136]              |
|              |            |                          | -2.36          |        | 0.39         | 0.19         |                   | Ref   | [141]              |

Таблица 18 — Продолжение таблицы 17.

| Об.          | Возраст | $H_{\delta_F}/H_{\beta}$ | [Fe/H] | [C/Fe]           | [Mg/Fe] | [Ca/Fe] | $[\alpha/Fe]$      | Метод | Ref                |
|--------------|---------|--------------------------|--------|------------------|---------|---------|--------------------|-------|--------------------|
| <b>N6535</b> | 11.2±1  | 1.23                     | -2.2   | 0.30             | -0.1    | 0.3     | 0.1                | IL    | [122] <sup>0</sup> |
|              |         |                          | -1.95  | -0.58            | 0.478   | 0.31    | 0.39 <sup>0</sup>  | HR    | [147] (7)          |
|              |         |                          | -1.80  | [-0.29<br>-0.58] |         |         |                    | LR    | [148] (2)          |
|              | 12.75   |                          | -1.79  |                  |         |         |                    | CMD   | [136]              |
| N6341        | 11.2    | 1.24                     | -1.95  |                  | 0.47    | 0.31    |                    | Ref   | [141]              |
|              |         |                          | -1.80  | -0.30            | -0.25   | 0.00    | -0.13 <sup>0</sup> | IL    | [92]               |
|              |         |                          | -2.23  | -0.41            | 0.14    | 0.10    | 0.22 <sup>0</sup>  | HR    | [146] (47)         |
|              | 12.75   |                          | -2.29  | [-0.40<br>-0.82] |         |         |                    | LR    | [148] (2)          |
|              |         |                          |        | -2.34            |         | 0.47    | 0.32               | 0.33  | Ref                |
|              |         |                          | -2.35  |                  |         |         |                    | CMD   | [136]              |
|              |         |                          | -2.33  |                  | 0.30    | 0.31    |                    | Ref   | [141]              |
| <b>N6749</b> | 10±3    | 1.17                     | -1.3   |                  |         |         | 0.3                | IL    | [122] <sup>0</sup> |
|              |         |                          | -1.59  |                  | 0.34    |         | 0.17               | LR    | [139] (4)          |
| N6779        | 12.6±1  | 1.17                     | -1.9   | -0.15            | -0.1    | 0.25    | 0.08               | IL    | [143]              |
|              | 12.75   |                          | -2.0   |                  |         |         |                    | CMD   | [136]              |
| <b>Pal10</b> | 10–13.6 | 0.41                     | 0.06   |                  |         |         | 0.3                | IL    | [122] <sup>0</sup> |
|              |         |                          | -0.24  |                  | 0.12    |         | 0.27               | LR    | [139] (4)          |
| N6528        | 12      | 0.23 <sup>S</sup>        | -0.12  | -0.35            | 0.25    | 0.30    | 0.28 <sup>0</sup>  | Ref   | [94]               |
|              | 11.75   |                          | -0.23  | 0.09             | 0.19    | 0.03    | 0.11 <sup>0</sup>  | IL    | [98]               |
|              |         |                          | -0.06  |                  | 0.11    | 0.15    | 0.11               | Ref   | [140]              |
|              |         |                          | -0.20  |                  | 0.26    | 0.03    | 0.15 <sup>0</sup>  | HR    | [149] (7)          |
|              | 7–10    |                          | -0.31  |                  | 0.02    | 0.20    | 0.11 <sup>0</sup>  | IL    | [21]               |
|              |         |                          | -0.10  |                  | 0.36    | 0.23    |                    | Ref   | [141]              |
| <b>Pal13</b> | 10      | 0.78                     | -2.0   |                  |         |         | 0.2                | IL    | [122] <sup>0</sup> |
|              |         |                          | -1.91  |                  | 0.39    | 0.29    | 0.34               | HR    | [150] (18)         |
|              |         |                          |        |                  |         |         | ±0.06              |       |                    |
| N6205        | 10      | 1.00                     | -1.7   | -0.12            | 0.2     | 0.3     | 0.25 <sup>0</sup>  | IL    | [24]               |
|              |         |                          | -1.57  |                  | 0.13    | 0.28    | 0.26               | Ref   | [140]              |
|              | 12      |                          | -1.58  |                  |         |         |                    | CMD   | [136]              |
|              |         |                          |        | -1.54            |         | 0.13    | 0.19               |       | Ref                |

6, 7 в Sharina & Maricheva 2021 [122]), шаровые скопления сравнения имеют оценки возраста, металличности и содержаний элементов, близкие к таковым у объектов исследования. Исключение составляют NGC6304 и NGC6624, отобранные для сравнения с Pal1. Необходимо отметить существенный разброс в оценках этих параметров в литературе у отдельных объектов. Так, литературные данные о содержаниях Mg у красных гигантов и, соответственно, содержания  $\alpha$ -элементов варьируются в некоторых случаях в широких пределах. Это не удивительно, так как Mg – это один из элементов, участвующий в химических реакциях, ответственных за формирование множественных звездных населений в шаровых скоплениях (см., например, Gratton et al. 2012 [151]). Причины же того, что содержание [C/Fe], определенное по спектрам суммарного излучения скоплений, систематически выше такового, определенного для их отдельных красных гигантов, обсуждались в статье Sharina et al. 2020 [24] (см. также Kraft et al. 1994 [95]).

У объектов исследования и их аналогов похожи и типы ГВ, о чем сигнализирует отношение индексов  $H_{\delta_F}/H_{\beta}$  [65]. Существенные различия иногда имеются между значениями  $H_{\gamma_A}$  и G4300 у объектов исследования и их аналогов, например, Pal13 и NGC6205, NGC6426 и NGC7078. Это, по-видимому, неслучайно. Области измерения двух индексов включают G-полосу. Ее глубина различна, в основном, по причине различий в содержании углерода. Другая причина может заключаться в относительном количестве звезд гигантов, вошедших в интегральный спектр.

### 4.3.1 Моделирование спектра NGC6535

Отношение сигнал/шум полученного суммарного спектра скопления NGC6535 позволяет проанализировать его методом популяционного синтеза с программным комплексом CLUSTER (см. раздел 1.1). Для моделирования спектра использовалась изохрона B08 [35] со следующими параметрами:  $Z = 0.0004$ ,  $Y = 0.26$  и возраст 11.2 млрд лет. Металличность скопления составляет  $[Fe/H] = -2.2$  dex. Полученное содержание химических элементов приведено в табл. 18. Помимо этого содержания, были определены  $[Na/Fe] = 0.0 \pm 0.25$ ,  $[Ti/Fe] =$

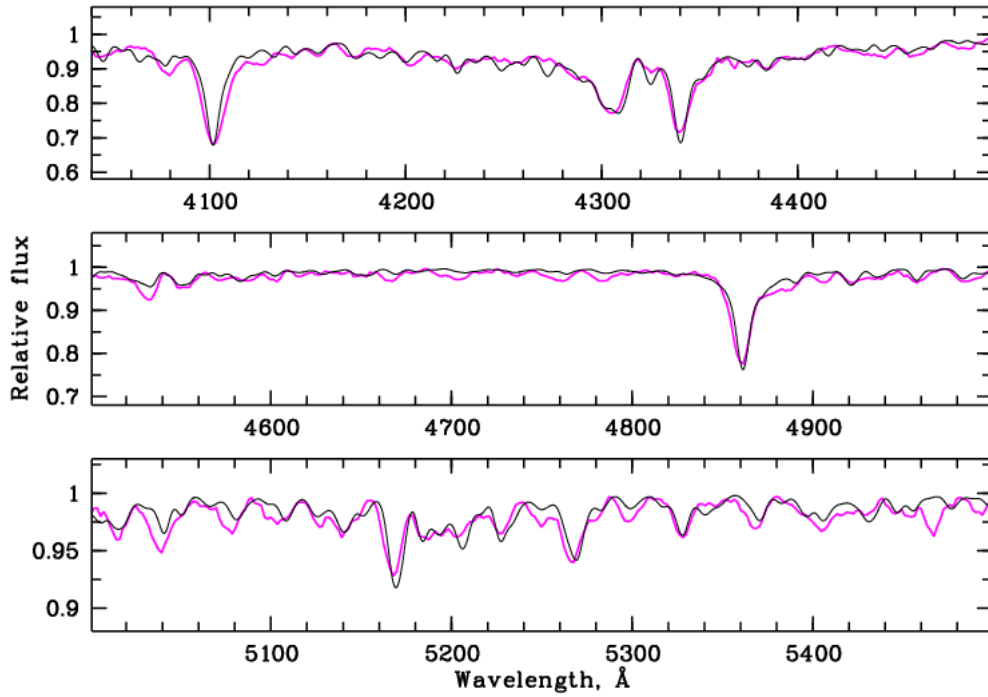


Рисунок 4.4 — Сравнение спектра NGC6535 (светлая линия) с синтетическим спектром, рассчитанным с изохроной B08 [35]  $Z = 0.0004$ ,  $Y = 0.26$ ,  $T = 11.2$  млрд лет.

$0.1 \pm 0.2$  dex,  $[\text{Cr}/\text{Fe}] = 0.0 \pm 0.2$  dex. Для сравнения приводится содержание, полученное в статье [147] методом спектроскопии высокого разрешения:  $[\text{Na}/\text{Fe}] = -0.34 \pm 0.136$  dex,  $[\text{Ti}/\text{FeI}] = 0.184 \pm 0.036$  dex,  $[\text{Cr}/\text{FeI}] = -0.177 \pm 0.015$  dex. Сравнение наблюдаемого, сглаженного по 5 точкам, и модельного спектров показано на рисунке 4.4.

Сравнение спектров NGC6535 и NGC6341 с помощью программы ULySS показано на рисунке 4.5. Видно, что G-полоса является более интенсивной у NGC6535.  $[\text{C}/\text{Fe}]$ , определенные здесь и авторами статьи Sharina et al. 2018 [92] по спектрам ОНР, действительно подтверждают этот вывод (табл. 18). Содержание углерода, определенное по отдельным красным гигантам NGC6535 и NGC6341 методом спектроскопии высокого разрешения, низкое и составляет  $[\text{C}/\text{Fe}] \sim -0.8 \dots -0.3$  (табл. 18).

#### 4.4 Диаграммы «цвет - звездная величина» для Pal10 и NGC6426

В работе Sharina & Maricheva 2021 [122] впервые были представлены результаты звездной фотометрии Pal10 с использованием прямых снимков из

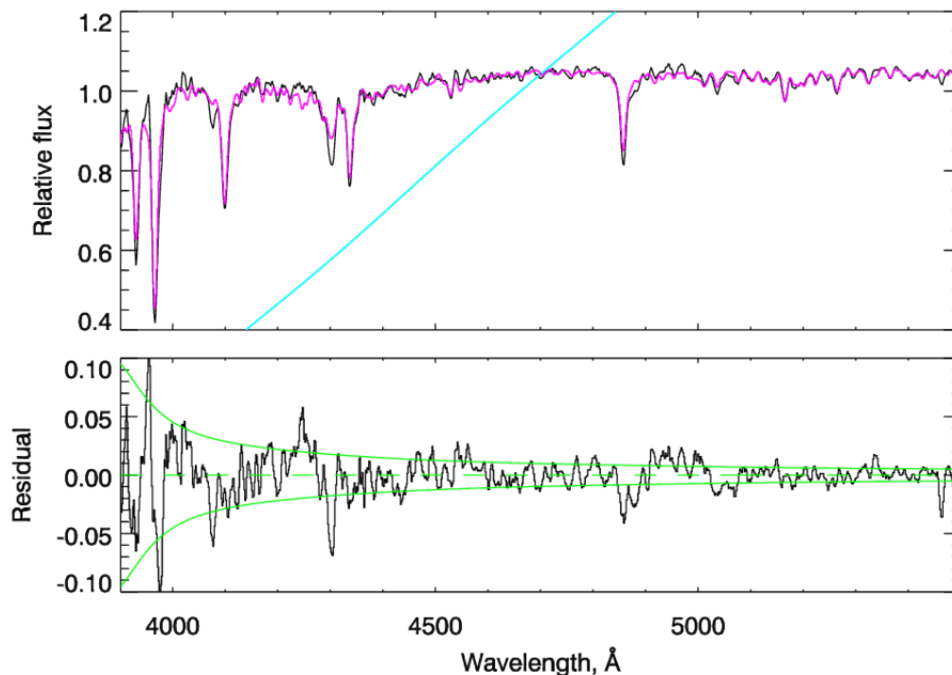


Рисунок 4.5 — Верхняя панель: сравнение спектров NGC6535 и NGC6341 (светлая цветная линия). Тонкая сплошная светлая (голубая) линия – полином, приводящий наблюдаемый спектр в соответствие с модельным. Нижняя панель – разница между наблюдаемым и модельным спектрами. Светлой (зеленой) сплошной линией показана огибающая, соответствующая  $S/N = 100$ . Штриховой линией показана линия нуля.

архива VLT (Very Large Telescope), полученных 18 марта 2006 г. (программа 077.D-0775) в фильтрах широкополосной системы Джонсона-Казинса с ПЗС-камерой инструмента FORS2 (см. работу Sharina & Maricheva 2021 [122] табл. 4 и раздел 3.1 в ней). Соответствующее CMD с указанием звезд, попавших в щель спектрографа в позиции 4 (цветные кружки), и изохронами Marigo et al. 2017 [152] показано на рисунке 4.6. Был выбран следующий избыток цвета и расстояние до объекта:  $E(B-V) = 1.4^m$ ,  $D = 7.4$  кпк. Положение на CMD остальных звезд еще в 3 позициях щели спектрографа, вошедших и не вошедших в спектр суммарного излучения Pal10, показано на рисунках на ftp-сайте САО<sup>9</sup>. На рисунке 4.6 видно большое число фоновых звезд. Это звезды главной последовательности Галактики, красные и голубые гиганты поля, а также звезды Галактики, проецирующиеся на эволюционные ветви скопления. Стоит также отметить, что CMD Pal10 испытывает большое дифференциальное покраснение, что было замечено впервые в статье Kaisler et al. 1997 [153]. Красная ГВ скопления вытягивается в полосу, параллельную вектору покраснения.

<sup>9</sup><ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/LickIndOHP/CMDpos>



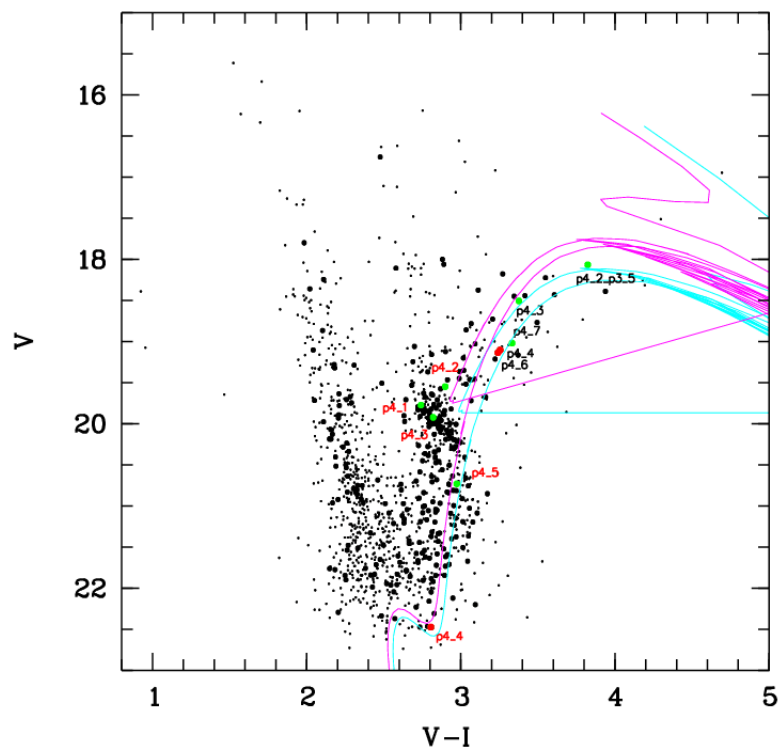


Рисунок 4.6 — CMD полученная для Pal10 (см. работу Sharina & Maricheva 2021 [122] раздел 3.1, 4.1 в ней). Звезды в пределах радиуса 1 угл. мин. от центра скопления показаны большими кружками. Цветными кружками отмечены звезды, попавшие в щель спектрографа в позиции 4. Красными кружками показаны звезды из их числа, не вошедшие в интегральный спектр. Розовой и голубой линиями показаны изохроны из Marigo et al. 2017 [152]  $Z = 0.01$ ,  $T = 6$  млрд лет и  $Z = 0.016$ ,  $T = 6$  млрд лет соответственно.

Kaisler et al. 1997 [153] определили следующие параметры на основе изображений:  $E(B-V) = 1.66^m$ ,  $D = 5.9$  кпк,  $[Fe/H] = -0.1$  dex. Необходимо отметить, что CMD Pal10, описанная в данном исследовании Sharina & Maricheva 2021 [122] более полна яркими звездами, красными гигантами ярче  $V \sim 19^m$ , по сравнению с CMD в Kaisler et al. 1997 [153]. Ни в Sharina & Maricheva 2021 [122], ни в Kaisler et al. 1997 [153] не удалось достичь фотометрической глубины ТПГП.

CMD, показанная на рисунке 4.7 (слева), построена по данным третьего релиза миссии Gaia (см. [155; 156] и ссылки в этих статьях) с отбором по собственным движениям, сделанным по предписаниям в Vasiliev 2019 [154]:  $-4.55 < \mu_{\alpha} < -4.18$ ,  $-7.55 < \mu_{\delta} < -6.98$  mas/уг. Положение звезд на CMD скорректировано за дифференциальное покраснение света методом Kaisler et al. 1997 [153]. Результаты фотометрии на снимках с VLT также были селектированы по собственным движениям путем отождествления звезд по координатам с данными Gaia DR3 и скорректированы за дифференциальное покраснение света.

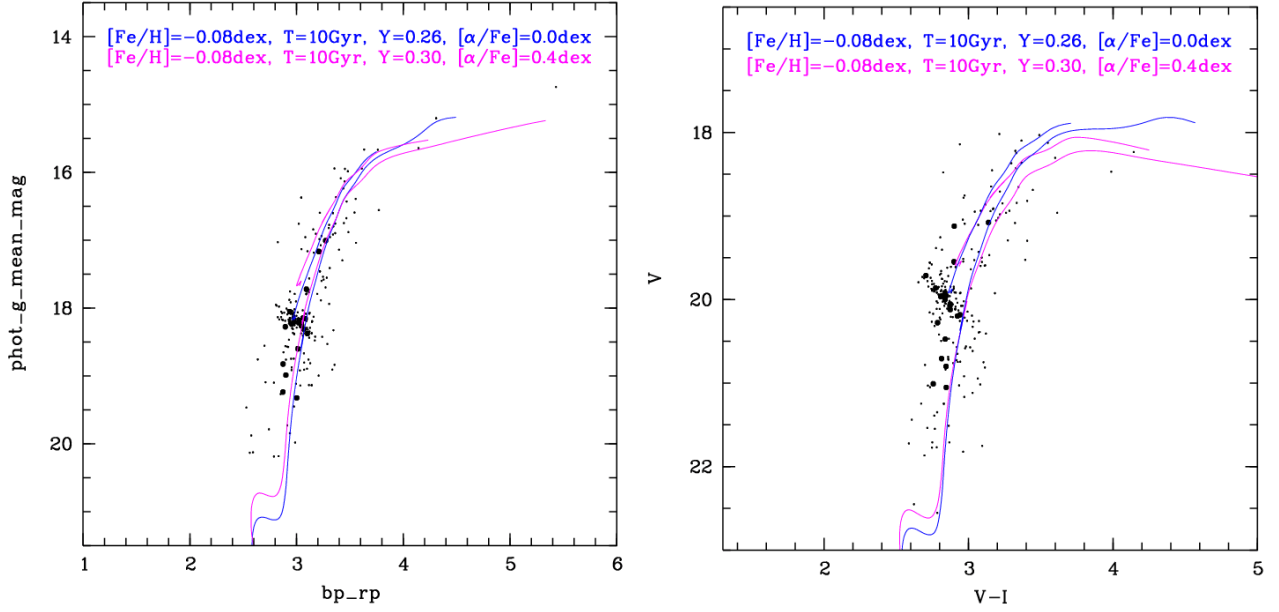


Рисунок 4.7 — CMD для Pal10 по результатам фотометрии Gaia DR3 (слева) и VLT (справа) (см. рис. 4.6) с селекцией по собственным движениям, согласно Vasiliev 2019 [154], и исправлением за дифференциальное покраснение (см. раздел 4.4). Звезды в центральной зоне ( $\sim 20$  угл.сек.) объекта показаны большими черными кружками. Нанесены изохроны BASTI [55] с параметрами, указанными в легенде на рисунке.

Очищенная таким способом от фоновых звезд CMD показана на рисунке 4.7 справа.

На рисунке 4.7 показаны также две изохроны BASTI<sup>10</sup> из работы Hidalgo et al. 2018 [55]. Для данных Gaia DR3 выбраны следующие избыток цвета и расстояние до объекта:  $E(B-V) = 1.42^m$  и  $D = 5.5$  кпк ( $[\alpha/Fe] = 0.0$  dex);  $E(B-V) = 1.38^m$  и  $D = 4.5$  кпк ( $[\alpha/Fe] = 0.4$  dex). Для данных VLT:  $E(B-V) = 1.35^m$  и  $D = 8$  кпк ( $[\alpha/Fe] = 0.0$  dex);  $E(B-V) = 1.31^m$  и  $D = 7$  кпк ( $[\alpha/Fe] = 0.4$  dex). Так как не удалось достичь ТППП, трудно оценить  $[\alpha/Fe]$  по распределению звезд на CMD методом вписывания изохрон. По этим данным для Pal10 получены результаты, согласующиеся с выводами Kaisler et al. 1997 [153]:  $[Fe/H] = -0.1 \pm 0.3$  dex (точность с учетом неопределенности  $[\alpha/Fe]$ ), возраст  $9 \pm 3$  млрд лет и расстояние составляет  $6 \pm 2$  кпк. Значение  $E(B-V) = 1.37 \pm 0.06^m$ , что на  $0.3^m$  меньше, чем у Kaisler et al. 1997 [153].

На рисунке 4.8 представлена CMD по данным Gaia DR3 [156] для NGC6426 с селекцией по собственным движениям, согласно Vasiliev 2019 [154]:  $-2.054 < pm_{ra} < -1.67$ ,  $-3.186 < pm_{dec} < -2.802$  mas/yr. Подобранные параметры изохроны BASTI [55] даны на рисунке 4.8 и соответствуют  $D = 20$  кпк и  $E(B-V) =$

<sup>10</sup><http://basti-iac.oa-abruzzo.inaf.it/isocs.html>

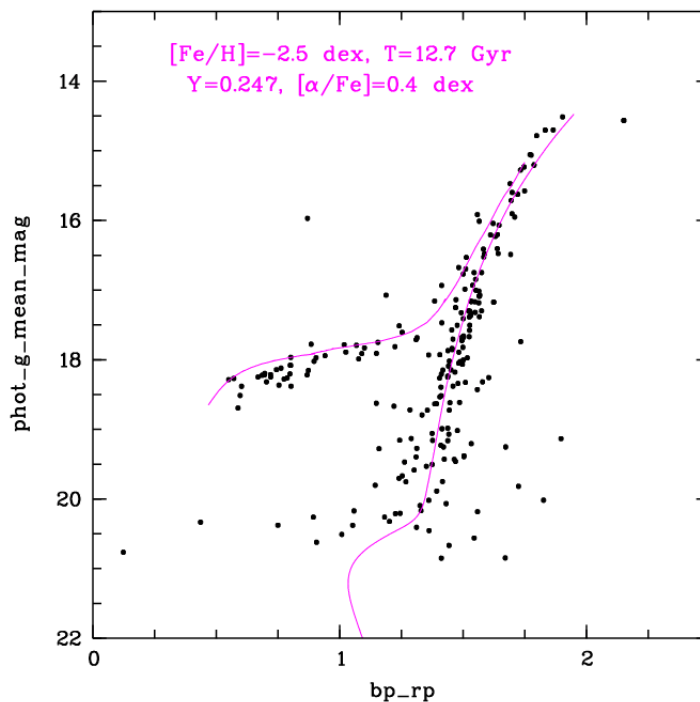


Рисунок 4.8 — CMD для NGC6426 по данным Gaia DR3 с селекцией по собственным движениям согласно Vasiliev 2019 [154]. Нанесена изохрона BASTI из [55] с параметрами, отмеченными на рисунке.

$0.405^m$ , что находится в хорошем согласии с таковыми в литературе (см. табл. 15).

#### 4.5 Обсуждение результатов

Далее приводятся замечания об отдельных скоплениях. Литературные оценки возраста Pal1 варьируются от 4 до 8 млрд лет [110; 157]. Оценки возраста, полученные в этом исследовании, ближе к таковой у Rosenberg et al. 1998 [157] (6.3-8 млрд лет). По результатам исследования спектров отдельных звезд высокого разрешения, у Pal1 наблюдаются: отсутствие Na/O антикорреляции у красных гигантов, необычные содержания элементов [133; 134]. Содержание Mg, Si, Ca, Ti, Co, V, и Y в Pal1 ниже, а Ba и La — выше, чем у звезд диска с такой металличностью. Скопление может быть ассоциировано с областью повышенной плотности звезд Canis Majoris [133; 134]. Не удалось найти скоплений Галактики, абсолютно похожих на Pal1 по значениям Ликских индексов. Индексы  $H_{\gamma A}$ ,  $H_{\gamma F}$ ,  $H_{\beta}$ ,  $Mg_2$ ,  $Mgb$  и некоторые другие у Pal1 существенно отли-

чаются от таковых у подобранных кандидатов в аналоги: NGC6304 и NGC6624. Согласно значениям водородных индексов, аналоги намного старше, чем Pal1. Из таблицы 17 видно, что  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и  $[\text{C}/\text{Fe}]$  у NGC6624 похожи на таковые у Pal1. Содержания  $\alpha$ -элементов у NGC6624 выше, чем у Pal1. Для NGC6304 нет данных спектроскопии высокого разрешения.

Для Pal2 в литературе на момент проведения исследования не было найдено данных спектроскопии высокого разрешения. Sarajedini et al. 2007 [110] отмечали сходство металличности Pal2 и NGC6752 и пониженное покраснение света на расстоянии в  $-38''$  к юго-западу от центра Pal2. Исследование CMD Pal2 затруднено из-за значительного дифференциального покраснения в направлении на антицентр Галактики [110]. Из результатов фотометрии [110] звезды отбирались в пределах  $\sim 8''$  от центра Pal2. Суммарный спектр был получен для разных позиций щели примерно в той же области. Pal2 и NGC7006, помимо сходства Ликских индексов, имеют похожие возрасты,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и содержание  $\alpha$ -элементов, определенное различными методами (см. табл. 15). Harris et al. 1997 [158] заметили, что ГВ скопления Pal2 содержит значительное число звезд в голубой и красной частях. Аналогичную структуру ГВ имеет NGC7006 (табл. 17), согласно определенному здесь  $\text{H}_{\delta_F}/\text{H}_{\beta}$ .

Pal14 – это скопление с красной ГВ, находящееся в гало. Однозначного мнения о происхождении объекта нет. Carretta et al. 2007 [159] и Vajkova et al. 2020 [160] считают его сформированным в Галактике. Vajkova & Bobylev 2021 [161] и Massari et al. 2019 [162] считают, что Pal14 был аккрецирован. Объект гало со схожей металличностью и строением ГВ – это Pal3 (см. Sharina et al. 2018 [92] и ссылки в этой статье). Ликские индексы водородных линий у Pal14 оказались похожими на таковые у NGC6229 (см. табл. 6 и 7 в [122]). В отличие от Pal14, у NGC6229 имеются звезды в голубой части ГВ. Однако у NGC6229 большое число звезд ГВ имеют цвета и светимости сходные с таковыми у так называемого «красного пятна» (red clump). Отношения индексов  $\text{H}_{\delta_F}/\text{H}_{\beta}$  у Pal14 и у NGC 6229 похожи: 0.9 и 1.0 соответственно. Они указывают на то, что у объектов ГВ промежуточного типа (см. [65]). Видимо, несколько голубых звезд ярче ТППП попали в спектр Pal14. Такие звезды видны на CMD Pal14. Çalışkan et al. 2012 [142] методами спектроскопии высокого разрешения обнаружили сходство содержаний элементов у нескольких красных гигантов в Pal14 с соответствующими

щими средними значениями у шаровых скоплений внешнего гало Галактики<sup>11</sup> и у отдельных звезд этой подсистемы, не входящих в скопления. Khamidullina et al. 2014 [143], моделируя тот же спектр суммарного излучения, полученный в ОНР, что использовался в этом исследовании, определили для NGC6229:  $\lg T = 10.1$ ,  $Y = 0.26$  и  $Z = 0.0004$ . В данной работе, аппроксимируя CMD Pal14, построенную по результатам фотометрии Hilker et al. 2006 [126] изохронами B08 [35], получены близкие значения:  $\lg T = 10.05$ ,  $Y = 0.23$  и  $Z = 0.0004$ .

NGC6426 – это одно из наиболее низкометаллических и старых шаровых скоплений гало Галактики [164]. Объект находится во внутреннем гало, как и найденный аналог NGC7078 (табл. 15) – массивное шаровое скопление со множественными звездными населенными [146]. Будущие наблюдения, возможно, дадут явные свидетельства множественности звездных населений у NGC6426. Единственное на сегодняшний день исследование Hanke et al. 2017 [145] спектров высокого разрешения звезд NGC6426 выявило лишь несколько слабых намеков на этот эффект, например, слабую антикорреляцию Mg-Si. Hanke et al. 2017 [145] отмечают, что полученные ими методом спектроскопии высокого разрешения содержания элементов тяжелее Zn указывают на возможное обогащение протоскопления продуктами вспышек гиперновых и быстрый процесс нуклеосинтеза. Сравнение спектров NGC6426 и NGC7078<sup>12</sup> показывает, что G-полоса, образованная в основном линиями молекулы CN 4250-4330 Å, намного интенсивнее у NGC6426. Это, видимо, говорит о более высоком среднем содержании углерода у NGC6426. Заметим, что в NGC6426 обнаружена углеродная звезда [165].

NGC 6535 считают объектом гало из-за его низкой металличности, несмотря на малое расстояние от центра Галактики (см., например, [163]). Piotto et al. 2015 [166] нашли, что ВКГ NGC6535 показывает расщепление, характерное для скоплений со множественными звездными населенными. Bragaglia et al. 2017 [147] определили содержание элементов для 30 красных гигантов скопления и подтвердили существование множественных звездных населений.

Вписывание изохрон B08 [35] в CMD скопления по результатам фотометрии Sarajedini et al. 2007<sup>13</sup> [110] дает более старый возраст – порядка 14 млрд

<sup>11</sup>В отличие от скоплений внутреннего гало, объекты внешнего гало находятся на расстоянии от центра Галактики больше 15 кпк. Скопления гало Галактики в среднем имеют возраст 10 млрд лет и  $[Fe/H] < -1.3$  dex (см., например, [163]).

<sup>12</sup>[ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/LickIndOHP/SpComp/ULySSngc6426\\_7078all.ps](ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/LickIndOHP/SpComp/ULySSngc6426_7078all.ps)

<sup>13</sup><ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/LickIndOHP/CMDpos/cmdN6535.ps>

лет – по сравнению с результатами анализа спектра (см. раздел 4.3.1). Видимо, вклады в полученный спектр голубых горячих звезд ГВ и более слабых голубых звезд на продолжении главной последовательности (голубые бродяги) довольно велики. Определенные здесь содержания Na оказались выше, а Mg и  $\alpha$ -элементов у NGC6535 и его аналога NCC6341 [92] оказались существенно ниже литературных значений для красных гигантов скоплений ([140; 146; 147]). Причина, видимо, состоит в том, что конвективные процессы в атмосферах красных гигантов выносят вещество, обогащенное продуктами нуклеосинтеза, из звездных недр на поверхность. В спектры же суммарного излучения большой вклад вносят более слабые звезды, в частности звезды главной последовательности. Полученное здесь содержание C и Ca для NGC6535 и NCC6341 согласуется с литературными данными.

Для NGC6749 и Pal10 результаты звездной фотометрии впервые были представлены в статье Kaisler et al. 1997 [153] (см. также данные фотометрии в разделе 4.4). Kaisler et al. 1997 [153] оценили  $[Fe/H]$  для скоплений по светимости и цвету звезд на ВКГ и ГВ:  $[Fe/H] = -0.1$  dex для Pal10 и  $[Fe/H] = -1.6$  dex для NGC6749 значения, близкие к таковым в таблицах 15 и 18. В литературе на момент проведения исследования не было данных спектроскопии высокого разрешения для NGC6749. Vasquez et al. 2018 [167] получили оценки металличности Pal10 по линиям инфракрасного триплета Ca II в широком диапазоне:  $[Fe/H] = -0.57...-0.27$  dex.

Pal13 – это объект внешнего гало Галактики, расположенный на большом расстоянии от ее центра, с возрастом, сравнимым с возрастом Вселенной [168]. Bradford et al. 2011 [124] с помощью фотометрических и спектральных наблюдений на CFHT определили  $[Fe/H] \sim -1.6$  dex, возраст 11-12 млрд лет, малую светимость, большой радиус на половине светимости для Pal13 и большую дисперсию скоростей. На CMD Pal13 [124] не видно ярко выраженной ГВ, но довольно много голубых бродяг. Koch et al. 2019 [150] определили металличность  $[Fe/H] = -1.91$  dex и содержание 14 химических элементов, используя наблюдения с высоким разрешением со спектрографом Keck/HIRES. Среднее содержание элементов  $\alpha$ -процесса Mg, Si, Ca и Ti  $[\alpha/Fe] = 0.34 \pm 0.06$  dex типично для шаровых скоплений и звезд поля гало Галактики при данной металличности.

Полученное в этом исследовании сходство Ликских индексов Pal13 и NGC6205 – массивного скопления со множественными звездными населения-

ми [166] и голубой ГВ – подтверждает не только сходство объектов по возрасту и химическому составу, что соответствует имеющимся литературным данным (табл. 18). Сходство Ликских индексов говорит в данном случае об отсутствии вклада самых голубых и горячих звезд ГВ в суммарный спектр NGC6205 (см. также [24]). Отношение индексов  $H_{\delta_F}/H_{\beta}$  свидетельствует о красной ГВ у Pal13 и промежуточного типа у NGC6205 по критерию [65]. Несмотря на сходство большинства индексов у Pal13 и NGC6205, существенные различия имеются в значениях  $H_{\gamma_A}$  и G4300. Это неслучайно. Области измерения двух индексов включают G-полосу. Ее глубина различна у двух объектов, видимо, по причине различий в содержании углерода.

#### 4.6 Заключение к главе 4

В главе представлен результат анализа спектров суммарного излучения восьми шаровых скоплений Галактики низкой светимости и звездной плотности. Определены значения абсорбционных индексов в Ликской системе, отобраны скопления-аналоги нашей Галактики из совпадения значений Ликских индексов в пределах ошибок их определения. Следует отметить, что для Pal1 полного сходства по значениям индексов не было найдено ни с одним объектом из [60]. Этот факт не противоречит выводу из [133] о возможном внегалактическом происхождении Pal1. Были определены возрасты, металличность и содержание элементов  $\alpha$ -процесса путем сравнения полученных индексов с моделями простых звездных населений [37; 38] и попиксельного сравнения спектров исследуемых скоплений и ярких скоплений Галактики. Для скопления NGC6535 выполнено моделирование методом популяционного синтеза, описанного в разделе 1.1. Были получены  $[Fe/H] = -2.2$  dex и следующие параметры изохроны B08 [35]:  $Z = 0.0004$ ,  $Y = 0.26$  и возраст 11.2 млрд лет. Вписывание изохрон B08 [35] в CMD скопления по результатам фотометрии Sarajedini et al. [110] дает более старый возраст – порядка 14 млрд лет. Видимо, вклады в полученный спектр голубых горячих звезд ГВ и более слабых голубых звезд на продолжении Главной последовательности (голубые бродяги) довольно велики.

Выполнена звездная фотометрия Pal10 на снимках из архива VLT. Полученная CMD не достигает фотометрической глубины ТППП, как и в работе [153], однако более полна звездами ярче  $V \sim 19^m$ . Также была проанализирована звездная фотометрия Gaia DR3 с селекцией по собственным движениям согласно [154]. Для анализа полученных CMD использовались изохроны из работ [55; 152]. Были определены следующие значения возраста и металличности:  $T = 9 \pm 3$  млрд. лет и  $[Fe/H] = -0.1 \pm 0.3$  dex, что согласуется с данными Kaisler et al. [153] и с результатами данного спектроскопического исследования. Расстояние и избыток цвета составили:  $D = 6 \pm 2$  кпк,  $E(B-V) = 1.37 \pm 0.06^m$ . Так как не удалось достичь ТППП, трудно оценить  $[\alpha/Fe]$  по распределению звезд на CMD методом вписывания изохрон. Проанализирована CMD, построенная по данным Gaia DR3 для NGC6426 с селекцией по собственным движениям согласно [154]. Определенные с помощью фотометрических данных Gaia DR3 и аппроксимации изохронами [55] возраст  $T = 12.7$  млрд. лет, металличность  $[Fe/H] = -2.5$  dex,  $[\alpha/Fe] = 0.4$  dex, избыток цвета  $E(B-V) = 0.405^m$  и расстояние  $D = 20$  кпк находятся в хорошем согласии с литературными данными и результатами данного спектроскопического исследования.



## Заключение

В рамках работы выполнено исследование спектров суммарного излучения шаровых скоплений нашей и других галактик. Выборка исследуемых скоплений включала в себя двенадцать внегалактических скоплений (группа галактик М31, Centaurs A и галактика М33) и восемь скоплений низкой видимой светимости в нашей Галактике. Для анализа спектров суммарного излучения выборки внегалактических скоплений использовался метод популяционного синтеза из работ Sharina et al. 2020, 2024 [24; 28]. Метод позволяет определять изохронные параметры возраста и удельного содержания гелия  $Y$ , а также содержание химических элементов Fe, C, N, Mg, Ca, Mn, Ti и Cr. Выполнено сравнение выбранных для анализа спектров скоплений изохрон с наблюдаемыми CMD скоплений, если таковые имелись. Выполнено сравнение полученных содержаний элементов исследуемых скоплений с таковыми у внегалактических шаровых скоплений из литературы и звезд поля нашей Галактики. Для выборки скоплений нашей Галактики выполнялось измерение абсорбционных индексов в Ликской системе в спектрах их суммарного излучения. Для оценки значений возраста, металличности и примерного содержания  $[\alpha/\text{Fe}]$  выполнялось сравнение с моделями простых звездных населений Thomas et al. 2003, 2004 [37; 38] и значениями индексов для шаровых скоплений Галактики из Schiavon et al. 2012 [60].

### Основные результаты работы заключаются в следующем:

1) Выполнено исследование влияния звезд ГВ на спектр суммарного излучения скопления, а также изменение параметров  $I_{core}$  и FWHM бальмеровских линий с возрастом в синтетических спектрах скоплений. Включение в суммарный спектр стадии ГВ приводит к немонотонному изменению этих параметров с возрастом, в отличие от случая учета только более ранних стадий звездной эволюции до ГВ. Можно сделать вывод, что недооценка вклада звезд ГВ в спектр суммарного излучения может приводить к недооценке возраста шарового скопления.

2) Выполнено исследование спектров суммарного излучения восьми внегалактических шаровых скоплений очень низкой металличности ( $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$  dex): PA, III, C39, B317, B2, B165, EHT8 (см. обозначения в табл. 2). Все шаровые

скопления в выборке старые ( $10 \leq T \leq 13.6$  млрд лет) и имеют протяженные ГВ. Из анализа спектров и сравнения выбранных для анализа изохрон с наблюдаемыми CMD скоплений НШ, В317 и ЕХТ8 определены параметры ГВ. Скопления НШ, С39 и ЕХТ8 имеют голубые протяженные ГВ с максимальной  $T_{eff} \sim 12\ 600$  К. Скопление КК содержит горячие звезды ГВ с  $T_{eff} \sim 10\ 000$  К. Максимальная  $T_{eff}$  звезд ГВ в других четырех скоплениях (РА, В317, В2 и В165) составляет  $8000 - 9000$  К. Были построены Hess-диаграммы по данным звездной фотометрии из работы Sharina et al. 2006 [86] для скоплений НШ, В317. Из сравнения используемых для анализа спектров скоплений НШ и В317 изохрон с наблюдаемыми Hess-диаграммами были получены модули расстояния и избытки цвета  $(m-M)_0 = 24.36 \pm 0.24$ ,  $24.64 \pm 0.2$  и  $E(B-V) = 0.17^m \pm 0.15$ ,  $0.08^m \pm 0.13$  для НШ и В317 соответственно. Химические содержания Са, Тi, С и Сг хорошо соответствуют содержаниям у звезд поля Галактики. Повышенное содержание углерода для скоплений, полученное в этой работе, относительно содержаний С для красных гигантов в шаровых скоплениях Галактики [94] связано с изменением химического состава звездных атмосфер в ходе их эволюции. Почти все шаровые скопления выборки, за исключением В317 и В165, имеют низкие содержания Mg ( $[Mg/Fe] \leq 0$ ) по сравнению со звездами поля, у которых  $[Mg/Fe] \sim 0.4$  dex. Это указывает на наличие в этих шаровых скоплениях множественных звездных населений (см. также [20]) и чрезвычайно обедненных магнием звезд [93].

3) Выполнено исследование спектров суммарного излучения четырех ярких шаровых скоплений М31: Vol6, Vol20, Vol45, Vol50. Общей особенностью четырех скоплений выборки является промежуточная металличность –  $[Fe/H]$   $[-1.1; -0.75]$  dex и старый возраст 11-14 млрд лет. Впервые определено содержание химических элементов С, N, O, Mg, Са, Mn, Тi и Сг для шаровых скоплений Vol 50 и Vol 20. Химический состав для Vol 6 и Vol 45 согласуется с литературными значениями в пределах ошибок. Используя данные, описанные здесь, нельзя однозначно судить о наличии множественных звездных населений в исследуемых объектах. Было установлено, что объекты исследования имеют более высокое содержание  $\alpha$ -элементов при их металличности, чем большинство шаровых скоплений и звезд поля в М31 и нашей Галактике. Полученные значения  $[\alpha/Fe]$  у четырех объектов соответствуют среднему значению  $[\alpha/Fe]$  звезд внутреннего гало на данном расстоянии от центра М31 ( $[\alpha/Fe] = 0.45$

+ 0.09 dex [120]). Выполнено сравнение используемых для анализа спектров изохрон с наблюдаемыми CMD скоплений Vol6 и Vol45. Из сравнения были получены следующие модули расстояния и избытки цвета  $(m-M)_0 = 24.57 \pm 0.08$ ,  $24.51 \pm 0.08$  и  $E(B-V) = 0.08^m \pm 0.02$ ,  $0.16^m \pm 0.02$  для Vol6 и Vol45 соответственно. Дополнительно расстояния для этих скоплений определялись по светимости вершины ветви красных гигантов, и были получены следующие значения:  $(m-M)_0 = 24.72 \pm 0.26$ ,  $24.59 \pm 0.21$  для Vol6 и Vol45 соответственно. Из полученных данных трудно судить о принадлежности исследуемых скоплений NGC205.

4) Впервые выполнено исследование полученных при наблюдениях в ОНР спектров суммарного излучения скоплений Галактики низкой светимости и звездной плотности: Pal1, Pal2, Pal10, Pal13, Pal14, NGC6426, NGC6535 и NGC6749. Определены значения абсорбционных индексов в Ликской системе, отобраны скопления-аналоги в нашей Галактике из совпадений значений Ликских индексов в пределах ошибок их определения. Следует отметить, что для Pal1 полного сходства по значениям индексов не было найдено ни с одним объектом из [60]. Этот факт не противоречит выводу из [133] о возможном внегалактическом происхождении Pal1. Были определены возрасты, металличность и содержания элементов  $\alpha$ -процесса из сравнения полученных индексов с моделями простых звездных населений [37; 38] и попиксельного сравнения спектров исследуемых скоплений и ярких скоплений Галактики. Для скопления NGC6535 выполнено моделирование методом популяционного синтеза, описанного в разделе 1.1. Были получены  $[Fe/H] = -2.2$  dex и следующие параметры изохроны B08 [35]:  $Z = 0.0004$ ,  $Y = 0.26$  и возраст 11.2 млрд лет. Вписывание изохрон B08 [35] в CMD скопления по результатам фотометрии Sarajedini et al. [110] дает более старый возраст – порядка 14 млрд лет. Видимо, вклады в полученный спектр голубых горячих звезд ГВ и более слабых голубых звезд на продолжении Главной последовательности (голубые бродяги) довольно велики.

Выполнена звездная фотометрия Pal10 на снимках из архива VLT. Полученная CMD не достигает фотометрической глубины ТПП как и в работе [153], однако более полна звездами ярче  $V \sim 19^m$ . Также была проанализирована звездная фотометрия Gaia DR3 с селекцией по собственным движениям согласно [154]. Для анализа полученных CMD использовались изохроны из работ [55; 152]. Были определены следующие значения возраста и металличности:

$T = 9 \pm 3$  млрд лет и  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.1 \pm 0.3$  dex, что согласуется с данными Kaisler et al. [153] и с результатами данного спектроскопического исследования. Расстояние и избыток цвета составили:  $D = 6 \pm 2$  кпк,  $E(\text{B-V}) = 1.37^m \pm 0.06$ . Так как не удалось достичь ТППП, трудно оценить  $[\alpha/\text{Fe}]$  по распределению звезд на CMD методом вписывания изохрон. Проанализирована CMD, построенная по данным Gaia DR3 для NGC6426 с селекцией по собственным движениям, согласно [154]. Определенные с помощью фотометрических данных Gaia DR3 и аппроксимацией изохронами [55] возраст  $T = 12.7$  млрд лет, металличность  $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5$  dex,  $[\alpha/\text{Fe}] = 0.4$  dex, избыток цвета  $E(\text{B-V}) = 0.405^m$  и расстояние  $D = 20$  кпк находятся в хорошем согласии с литературными данными и результатами данного спектроскопического исследования.

**Благодарности.** Автор выражает особую благодарность научному руководителю и соавтору публикаций Шариной М. Е. за руководство работой, полезные замечание, поддержку и терпение, а также сотрудникам лаборатории внегалактической астрофизики и космологии САО РАН. Автор выражает благодарность Шиманскому В. В. за ценные комментарии и помощь в обсуждении результатов работы. За помощь в организационных вопросах и поддержку автор выражает благодарность Шолуховой О. Н., Кайсиной Е. И., Панчук А. В. Автор выражает благодарность ответственным наблюдателям и сотрудникам, ответственным за работу прибора SCORPIO-I, результаты наблюдений с которого послужили основой данной диссертации. Отдельно автор выражает благодарность Мироновой А. И. за корректуру данной работы.

## Список литературы

1. *Lada C. J., Lada E. A.* Embedded Clusters in Molecular Clouds // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2003. — Янв. — Т. 41. — С. 57—115.
2. *Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., Gieles M.* Young Massive Star Clusters // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2010. — Сент. — Т. 48. — С. 431—493.
3. *Navarro J. F., White S. D. M.* Simulations of dissipative galaxy formation in hierarchically clustering universes-2. Dynamics of the baryonic component in galactic haloes // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1994. — Март. — Т. 267, № 2. — С. 401—412.
4. Introducing the Illustris project: the evolution of galaxy populations across cosmic time / S. Genel [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — Нояб. — Т. 445, № 1. — С. 175—200.
5. The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments / J. Schaye [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2015. — Янв. — Т. 446, № 1. — С. 521—554.
6. The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk / A. Helmi [и др.] // Nature. — 2018. — Окт. — Т. 563, № 7729. — С. 85—88.
7. *Forbes D. A.* Reverse engineering the Milky Way // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Март. — Т. 493, № 1. — С. 847—854.
8. The Large-scale Structure of the Halo of the Andromeda Galaxy. I. Global Stellar Density, Morphology and Metallicity Properties / R. A. Ibata [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2014. — Янв. — Т. 780, № 2. — С. 128.
9. The Large-scale Structure of the Halo of the Andromeda Galaxy. II. Hierarchical Structure in the Pan-Andromeda Archaeological Survey / A. W. McConnachie [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2018. — Т. 868, № 1. — С. 55.

10. *Sharina M. E.* Properties and Formation of Star Clusters // *Astrophysics*. — 2016. — Т. 59, № 1. — С. 126—144.
11. *Acharova I. A., Sharina M. E., Kazakov E. A.* Investigation of the Prompt SNe Ia progenitor nature through the analysis of the chemical composition of globular clusters and circumgalactic clouds // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — Т. 511, № 1. — С. 800—813.
12. Properties of stellar generations in globular clusters and relations with global parameters / *E. Carretta [и др.]* // *Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — ИЮНЬ. — Т. 516. — А55.
13. *Prantzos N., Charbonnel C., Iliadis C.* Revisiting nucleosynthesis in globular clusters. The case of NGC 2808 and the role of He and K // *Astronomy and Astrophysics*. — 2017. — Дек. — Т. 608. — А28.
14. *Milone A. P., Marino A. F.* Multiple Populations in Star Clusters // *Universe*. — 2022. — ИЮНЬ. — Т. 8, № 7. — С. 359.
15. Helium variation due to self-pollution among Globular Cluster stars. Consequences on the horizontal branch morphology / *F. D’Antona [и др.]* // *Astronomy and Astrophysics*. — 2002. — Ноябрь. — Т. 395. — С. 69—75.
16. *Lee H.-c., Yoon S.-J., Lee Y.-W.* The  $H\beta$  Index as an Age Indicator of Old Stellar Systems: The Effects of Horizontal-Branch Stars // *The Astronomical Journal*. — 2000. — Август. — Т. 120, № 2. — С. 998—1005.
17. *D’Antona F., Caloi V., Tailo M.* On the blind use of statistical tools in the analysis of globular cluster stars // *Nature Astronomy*. — 2018. — Т. 2. — С. 270—272.
18. What is a globular cluster? An observational perspective / *R. Gratton [и др.]* // *Astronomy and Astrophysics*. — 2019. — Т. 27, № 1. — С. 8.
19. Investigating the Metallicity-Mixing-length Relation / *L. S. Viani [и др.]* // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Май. — Т. 858, № 1. — С. 28.
20. The chemical composition of globular clusters in the Local Group / *S. S. Larsen [и др.]* // *Astronomy and Astrophysics*. — 2022. — Апрель. — Т. 660. — А88.

21. *Colucci J. E., Bernstein R. A., McWilliam A.* Globular Cluster Abundances from High-resolution, Integrated-light Spectroscopy. II. Expanding the Metallicity Range for Old Clusters and Updated Analysis Techniques // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — ЯНВ. — Т. 834, № 2. — С. 105.
22. INFRARED HIGH-RESOLUTION INTEGRATED LIGHT SPECTRAL ANALYSES OF M31 GLOBULAR CLUSTERS FROM APOGEE / C. M. Sakari [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — Т. 829, № 2. — С. 116.
23. *Benítez-Llambay A., Clariá J. J., Piatti A. E.* Fast Integrated Spectra Analyzer: A New Computational Tool for Age and Reddening Determination of Small Angular Diameter Open Clusters // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2012. — ФЕВР. — Т. 124, № 912. — С. 173.
24. *Sharina M. E., Shimansky V. V., Shimanskaya N. N.* Analysis of Integrated-Light Spectra of Galactic Globular Clusters // *Astrophysical Bulletin*. — 2020. — Т. 75, № 3. — С. 247–266.
25. Spectroscopic ages and metallicities of stellar populations: validation of full spectrum fitting / M. Koleva [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2008. — АПР. — Т. 385, № 4. — С. 1998–2010.
26. ULySS: a full spectrum fitting package / M. Koleva [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2009. — ИЮЛЬ. — Т. 501, № 3. — С. 1269–1279.
27. Evolutionary stellar population synthesis with MILES - I. The base models and a new line index system / A. Vazdekis [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — ИЮНЬ. — Т. 404, № 4. — С. 1639–1671.
28. Horizontal branch structure, age, and chemical composition for very metal-poor extragalactic globular clusters / M. E. Sharina [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2024. — МАРТ. — Т. 528, № 4. — С. 7165–7185.
29. *Smith G. H., Martell S. L.* Comparing Deep Mixing in Globular Cluster and Halo Field Giants: Carbon Abundance Data from the Literature // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2003. — ОКТ. — Т. 115, № 812. — С. 1211–1219.

30. Stellar Chemical Signatures and Hierarchical Galaxy Formation / K. A. Venn [и др.] // The Astronomical Journal. — 2004. — СЕНТ. — Т. 128, № 3. — С. 1177—1195.
31. *Ishigaki M. N., Aoki W., Chiba M.* Chemical Abundances of the Milky Way Thick Disk and Stellar Halo. II. Sodium, Iron-peak, and Neutron-capture Elements // The Astrophysical Journal. — 2013. — ИЮЛЬ. — Т. 771, № 1. — С. 67.
32. Observational constraints on the origin of the elements. III. Evidence for the dominant role of sub-Chandrasekhar SN Ia in the chemical evolution of Mn and Fe in the Galaxy / P. Eitner [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2020. — Март. — Т. 635. — A38.
33. The Pristine survey - XV. A CFHT ESPaDOnS view on the Milky Way halo and disc populations / R. Lucchesi [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — Март. — Т. 511, № 1. — С. 1004—1021.
34. *Colucci J. E., Bernstein R. A., Cohen J. G.* The Detailed Chemical Properties of M31 Star Clusters. I. Fe, Alpha and Light Elements // The Astrophysical Journal. — 2014. — Т. 797, № 2. — С. 116.
35. Scaled solar tracks and isochrones in a large region of the Z-Y plane. I. From the ZAMS to the TP-AGB end for 0.15-2.5  $\{M\}_{\odot}$  stars / G. Bertelli [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2008. — Т. 484, № 3. — С. 815—830.
36. A Large Stellar Evolution Database for Population Synthesis Studies. I. Scaled Solar Models and Isochrones / A. Pietrinferni [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2004. — Т. 612, № 1. — С. 168—190.
37. *Thomas D., Maraston C., Bender R.* New clues on the calcium underabundance in early-type galaxies // Monthly Notice of the Royal Astronomical Society. — 2003. — ИЮЛЬ. — Т. 343, № 1. — С. 279—283.
38. *Thomas D., Maraston C., Korn A.* Higher-order Balmer line indices in  $\alpha$ /Fe-enhanced stellar population models // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2004. — ИЮНЬ. — Т. 351, № 1. — С. L19—L23.
39. Atmospheric Parameters and Metallicities for 2191 Stars in the Globular Cluster M4 / L. Malavolta [и др.] // The Astronomical Journal. — 2014. — ФЕВР. — Т. 147, № 2. — С. 25.



40. *Sharina M. E., Shimansky V. V., Kniazev A. Y.* Nuclei of dwarf spheroidal galaxies KKs 3 and ESO 269-66 and their counterparts in our Galaxy // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — Окт. — Т. 471, № 2. — С. 1955—1975.
41. Gemini spectroscopy of the outer disk star cluster BH176 / M. E. Sharina [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2014. — Окт. — Т. 570. — A48.
42. *Castelli F., Kurucz R. L.* New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres // Modelling of Stellar Atmospheres. Т. 210 / под ред. N. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray. — 2003. — A20.
43. *Grevesse N., Sauval A. J.* Standard Solar Composition // Space Science Reviews. — 1998. — Май. — Т. 85. — С. 161—174.
44. *Morton D. C.* Atomic Data for Resonance Absorption Lines. I. Wavelengths Longward of the Lyman Limit // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1991. — Сент. — Т. 77. — С. 119.
45. *Shimansky V. V., Borisov N. V., Shimanskaya N. N.* The Impact of Reflection Effects on the Parameters of the Old Pre-Cataclysmic Variables MS Peg and LM Com // Astronomy Reports. — 2003. — Сент. — Т. 47, № 9. — С. 763—776.
46. *Suleimanov V. F.* Can optical absorption lines be observed in the spectra of x-ray novae? // Astronomy Letters. — 1996. — Янв. — Т. 22, № 1. — С. 92—107.
47. *Chabrier G.* The Initial Mass Function: From Salpeter 1955 to 2005 // The Initial Mass Function 50 Years Later. Т. 327 / под ред. E. Corbelli, F. Palla, H. Zinnecker. — 2005. — С. 41. — (Astrophysics and Space Science Library).
48. *Padoan P., Nordlund Å.* The “Mysterious” Origin of Brown Dwarfs // The Astrophysical Journal. — 2004. — Дек. — Т. 617, № 1. — С. 559—564.
49. M Dwarfs from Hubble Space Telescope Star Counts. IV. / Z. Zheng [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2001. — Июль. — Т. 555, № 1. — С. 393—404.
50. *Salpeter E. E.* The Luminosity Function and Stellar Evolution. // The Astrophysical Journal. — 1955. — Янв. — Т. 121. — С. 161.

51. *Kroupa P.* On the variation of the initial mass function // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2001. — Апр. — Т. 322, № 2. — С. 231—246.
52. *Sharina M. E., Shimansky V. V.* Age and chemical composition of the globular cluster NGC 6652 // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2020. — АВГ. — Т. 20, № 8. — С. 128.
53. *Grevesse N., Noels A.* Atomic data and the spectrum of the solar photosphere. // Physica Scripta Volume T. — 1993. — ЯНВ. — Т. 47. — С. 133—138.
54. Solar Chemical Abundances Determined with a CO5BOLD 3D Model Atmosphere / E. Caffau [и др.] // Solar Physics. — 2011. — Февр. — Т. 268, № 2. — С. 255—269.
55. The Updated BaSTI Stellar Evolution Models and Isochrones. I. Solar-scaled Calculations / S. L. Hidalgo [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2018. — Т. 856, № 2. — С. 125.
56. Updated BaSTI Stellar Evolution Models and Isochrones. II.  $\alpha$ -enhanced Calculations / A. Pietrinferni [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2021. — Т. 908, № 1. — С. 102.
57. Old stellar populations. I. A spectroscopic comparison of galactic globular clusters, M 31 globular clusters, and elliptical galaxies. / D. Burstein [и др.] // Astrophysical Journal. — 1984. — Дек. — Т. 287. — С. 586—609.
58. Old Stellar Populations. V. Absorption Feature Indices for the Complete Lick/IDS Sample of Stars / G. Worthey [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1994. — Окт. — Т. 94. — С. 687.
59. *Worthey G., Ottaviani D. L.* H $\gamma$  and H $\delta$  Absorption Features in Stars and Stellar Populations // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1997. — АВГ. — Т. 111, № 2. — С. 377—386.
60. Star Clusters in M31. IV. A Comparative Analysis of Absorption Line Indices in Old M31 and Milky Way Clusters / R. P. Schiavon [и др.] // The Astronomical Journal. — 2012. — ЯНВ. — Т. 143, № 1. — С. 14.

61. SAO RAS 6-m telescope spectroscopic observations of globular clusters in nearby galaxies / M. E. Sharina [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2010. — Июнь. — Т. 405, № 2. — С. 839—856.
62. A Helium Spread among the Main-Sequence Stars in NGC 2808 / F. D'Antona [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2005. — Окт. — Т. 631, № 2. — С. 868—878.
63. *Cabrera-Ziri I., Conroy C.* Deriving ages and horizontal branch properties of integrated stellar populations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — Март. — Т. 511, № 1. — С. 341—355.
64. Inferring the helium abundance of extragalactic globular clusters using integrated spectra / H. J. Leath [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — Май. — Т. 512, № 1. — С. 548—562.
65. The Identification of Blue Horizontal-Branch Stars in the Integrated Spectra of Globular Clusters / R. P. Schiavon [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2004. — Июнь. — Т. 608, № 1. — С. L33—L36.
66. *Percival S. M., Salaris M.* Modelling realistic horizontal branch morphologies and their impact on spectroscopic ages of unresolved stellar systems // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2011. — Апр. — Т. 412, № 4. — С. 2445—2453.
67. 2MASS NIR photometry for 693 candidate globular clusters in M 31 and the Revised Bologna Catalogue / S. Galleti [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2004. — Март. — Т. 416. — С. 917—924.
68. *Ma J.* New UBVRI Photometry of 234 M33 Star Clusters // The Astronomical Journal. — 2013. — Апр. — Т. 145, № 4. — С. 88.
69. Newly discovered globular clusters in NGC 147 and NGC 185 from PAndAS / J. Veljanoski [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2013. — Ноябрь. — Т. 435, № 4. — С. 3654—3666.
70. An extremely metal-deficient globular cluster in the Andromeda Galaxy / S. S. Larsen [и др.] // Science. — 2020. — Ноябрь. — Т. 370, № 6519. — С. 970—973.

71. Globular cluster systems in nearby dwarf galaxies - II. Nuclear star clusters and their relation to massive Galactic globular clusters / I. Y. Georgiev [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2009. — ИЮНЬ. — Т. 396, № 2. — С. 1075—1085.
72. *Karachentseva V. E., Karachentsev I. D.* A list of new nearby dwarf galaxy candidates // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. — 1998. — ФЕВР. — Т. 127. — С. 409—419.
73. Metal-poor nuclear star clusters in two dwarf galaxies near Centaurus A suggesting formation from the in-spiraling of globular clusters / K. Fahrion [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2020. — ФЕВР. — Т. 634. — A53.
74. The Hubble Flow around the Centaurus A/M83 Galaxy Complex / I. D. Karachentsev [и др.] // The Astronomical Journal. — 2007. — ФЕВР. — Т. 133, № 2. — С. 504—517.
75. *Harris W. E.* A New Catalog of Globular Clusters in the Milky Way // arXiv e-prints. — 2010. — ДЕК. — arXiv:1012.3224.
76. An old, metal-poor globular cluster in Sextans A and the metallicity floor of globular cluster systems / M. A. Beasley [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — АВГ. — Т. 487, № 2. — С. 1986—1993.
77. Star Clusters in M31. II. Old Cluster Metallicities and Ages from Hectospec Data / N. Caldwell [и др.] // The Astronomical Journal. — 2011. — ФЕВР. — Т. 141, № 2. — С. 61.
78. The outer halo globular cluster system of M31 - I. The final PAndAS catalogue / A. P. Huxor [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — АВГ. — Т. 442, № 3. — С. 2165—2187.
79. *Afanasiev V. L., Moiseev A. V.* The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // Astronomy Letters. — 2005. — МАРТ. — Т. 31, № 3. — С. 194—204.
80. MIDAS - Eso's New Image Processing System / K. Banse [и др.] // The Messenger. — 1983. — МАРТ. — Т. 31. — С. 26.
81. *Tody D.* IRAF in the Nineties. — 1993. — ЯНВ.

82. Hectospec, the MMT's 300 Optical Fiber-Fed Spectrograph / D. Fabricant [и др.] // The Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2005. — Дек. — Т. 117, № 838. — С. 1411—1434.
83. Evolutionary synthesis of galaxies at high spectral resolution with the code PEGASE-HR. Metallicity and age tracers / D. Le Borgne [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2004. — Окт. — Т. 425. — С. 881—897.
84. *Prugniel P., Soubiran C.* A database of high and medium-resolution stellar spectra // Astronomy and Astrophysics. — 2001. — Апр. — Т. 369. — С. 1048—1057.
85. *Larsen S. S., Romanowsky A. J., Brodie J. P.* Hubble Space Telescope imaging of the extremely metal-poor globular cluster EXT8 in Messier 31 // Astronomy and Astrophysics. — 2021. — Июль. — Т. 651. — A102.
86. *Sharina M. E., Afanasiev V. L., Puzia T. H.* Ages, metallicities and  $[\alpha/\text{Fe}]$  ratios of globular clusters in NGC 147, 185 and 205 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2006. — Нояб. — Т. 372, № 3. — С. 1259—1274.
87. *Schlafly E. F., Finkbeiner D. P.* Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // The Astrophysical Journal. — 2011. — Авг. — Т. 737, № 2. — С. 103.
88. The horizontal branch luminosity vs. metallicity in M 31 globular clusters / L. Federici [и др.] // Astronomy & Astrophysics. — 2012. — Т. 544. — A155.
89. Reddening, colour and metallicity of the M31 globular cluster system / Z. Fan [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2008. — Апр. — Т. 385, № 4. — С. 1973—1988.
90. Distances and metallicities for 17 Local Group galaxies / A. W. McConnachie [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2005. — Янв. — Т. 356, № 3. — С. 979—997.
91. Manganese Indicates a Transition from Sub- to Near-Chandrasekhar Type Ia Supernovae in Dwarf Galaxies / M. A. C. de los Reyes [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2020. — Март. — Т. 891, № 1. — С. 85.

92. *Sharina M. E., Shimansky V. V., Khamidullina D. A.* Age, Helium Content and Chemical Composition of Globular Clusters in the M31 Neighborhood and in our Galaxy // *Astrophysical Bulletin*. — 2018. — Т. 73, № 3. — С. 318—334.
93. Homogeneous analysis of globular clusters from the APOGEE survey with the BACCHUS code. I. The northern clusters / T. Masseron [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2019. — Февр. — Т. 622. — A191.
94. Constraining Stellar Population Models. I. Age, Metallicity and Abundance Pattern Compilation for Galactic Globular Clusters / J. C. Roediger [и др.] // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2014. — Янв. — Т. 210, № 1. — С. 10.
95. *Kraft R. P.* Abundance Differences among Globular Cluster Giants: Primordial vs. Evolutionary Scenarios // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 1994. — Т. 106. — С. 553.
96. Mixing along the red giant branch in metal-poor field stars / R. G. Gratton [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2000. — Февр. — Т. 354. — С. 169—187.
97. A Library of Integrated Spectra of Galactic Globular Clusters / R. P. Schiavon [и др.] // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2005. — Т. 160, № 1. — С. 163—175.
98. Metal-rich, Metal-poor: Updated Stellar Population Models for Old Stellar Systems / C. Conroy [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Февр. — Т. 854, № 2. — С. 139.
99. Two major accretion epochs in M31 from two distinct populations of globular clusters / D. Mackey [и др.] // *Nature*. — 2019. — № 574. — С. 69—71.
100. *Caldwell N., Romanowsky A. J.* Star Clusters in M31. VII. Global Kinematics and Metallicity Subpopulations of the Globular Clusters // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — Т. 824, № 1. — С. 42.
101. Full spectral fitting of Milky Way and M 31 globular clusters: ages and metallicities / E. Cezario [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2013. — Т. 549. — A60.

102. LICK INDICES AND SPECTRAL ENERGY DISTRIBUTION ANALYSIS BASED ON AN M31 STAR CLUSTER SAMPLE: COMPARISONS OF METHODS AND MODELS / Z. Fan [и др.] // The Astronomical Journal. — 2016. — Т. 152, № 6. — С. 208.
103. A Star in the M31 Giant Stream: The Highest Negative Stellar Velocity Known / N. Caldwell [и др.] // The Astronomical Journal. — 2010. — Т. 139, № 2. — С. 372—377.
104. Wang S., Ma J., Liu J. Globular clusters in the outer halo of M 31 // Astronomy & Astrophysics. — 2019. — Т. 623. — A65.
105. Optimal integrated abundances for chemical tagging of extragalactic globular clusters / C. M. Sakari [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — Т. 443, № 3. — С. 2285—2310.
106. Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds // The Astrophysical Journal. — 1998. — ИЮНЬ. — Т. 500, № 2. — С. 525—553.
107. Structural Parameters for Globular Clusters in M31 and Generalizations for the Fundamental Plane / P. Barmby [и др.] // The Astronomical Journal. — 2007. — ИЮНЬ. — Т. 133, № 6. — С. 2764—2786.
108. Maricheva M. I. Study of Integrated Spectra of Four Globular Clusters in M 31 // Astrophysical Bulletin. — 2021. — ОКТ. — Т. 76, № 4. — С. 389—404.
109. Sharina M. E., Maricheva M. I. Chemical composition and ages of four globular clusters in M31 from the analysis of their integrated-light spectra // Open Astronomy. — 2022. — МАРТ. — Т. 31, № 1.
110. The ACS Survey of Galactic Globular Clusters. I. Overview and Clusters without Previous Hubble Space Telescope Photometry / A. Sarajedini [и др.] // The Astronomical Journal. — 2007. — АПР. — Т. 133, № 4. — С. 1658—1672.
111. Hubble Space Telescope Observations of Globular Clusters in M31. I. Color-Magnitude Diagrams, Horizontal Branch Metallicity Dependence, and the Distance to M31 / E. A. Ajhar [и др.] // Astronomical Journal. — 1996. — МАРТ. — Т. 111. — С. 1110.

112. Hubble Space Telescope WFPC2 Color-Magnitude Diagrams for Globular Clusters in M31 / R. M. Rich [и др.] // The Astronomical Journal. — 2005. — Т. 129, № 6. — С. 2670—2691.
113. *Lee M. G., Freedman W. L., Madore B. F.* The Tip of the Red Giant Branch as a Distance Indicator for Resolved Galaxies // Astrophysical Journal. — 1993. — Ноябрь. — Т. 417. — С. 553.
114. *Da Costa G. S., Armandroff T. E.* Standard Globular Cluster Giant Branches in the (M(I), (V - I)<sub>o</sub>) Plane // Astronomical Journal. — 1990. — Июль. — Т. 100. — С. 162.
115. *Sakai S., Madore B. F., Freedman W. L.* Tip of the Red Giant Branch Distances to Galaxies. III. The Dwarf Galaxy Sextans A // Astrophysical Journal. — 1996. — Апрель. — Т. 461. — С. 713.
116. *Sharina M. E., Shimansky V. V., Davoust E.* Modeling and analysis of the spectrum of the globular cluster NGC 2419 // Astronomy Reports. — 2013. — Июнь. — Т. 57, № 6. — С. 410—422.
117. *Larsen S. S., Brodie J. P., Strader J.* Detailed abundances from integrated-light spectroscopy: Milky Way globular clusters // Astronomy & Astrophysics. — 2017. — Май. — Т. 601. — A96.
118. *Carretta E., Bragaglia A.* Excess of Ca (and Sc) produced in globular cluster multiple populations: a first census in 77 Galactic globular clusters // Astronomy and Astrophysics. — 2021. — Февр. — Т. 646. — A9.
119. Galactic Chemical Evolution: Carbon through Zinc / C. Kobayashi [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2006. — Дек. — Т. 653, № 2. — С. 1145—1171.
120. Elemental Abundances in M31: Iron and Alpha Element Abundances in M31's Outer Halo / K. M. Gilbert [и др.] // The Astronomical Journal. — 2020. — Июль. — Т. 160, № 1. — С. 41.
121. *Caldwell N., Romanowsky A. J.* Star Clusters in M31. VII. Global Kinematics and Metallicity Subpopulations of the Globular Clusters // The Astrophysical Journal. — 2016. — Июнь. — Т. 824, № 1. — С. 42.
122. *Sharina M. E., Maricheva M. I.* Properties of Stellar Populations of Eight Galactic Globular Clusters with Low Central Surface Brightness // Astronomy Reports. — 2021. — Июнь. — Т. 65, № 6. — С. 455—476.



123. Discovery of Tidal Tails Around the Distant Globular Cluster Palomar 14 / A. Sollima [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2011. — ЯНВ. — Т. 726, № 1. — С. 47.
124. Structure and Dynamics of the Globular Cluster Palomar 13 / J. D. Bradford [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2011. — Дек. — Т. 743, № 2. — С. 167.
125. Reflective aspherized grating spectrographs for the Haute-Provence, and Nanjing Observatories : MARLYs and CARELEC. / G. Lemaître [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 1990. — Февр. — Т. 228. — С. 546—558.
126. *Hilker M.* Probable member stars of the gravitational theory-testing globular clusters AM 1, Pal 3 and Pal 14 // Astronomy and Astrophysics. — 2006. — Март. — Т. 448, № 1. — С. 171—180.
127. *Alonso A., Arribas S., Martínez-Roger C.* The effective temperature scale of giant stars (F0-K5). II. Empirical calibration of  $T_{eff}$  versus colours and [Fe/H] // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. — 1999. — Дек. — Т. 140. — С. 261—277.
128. *Ramírez I., Meléndez J.* The Effective Temperature Scale of FGK Stars. II.  $T_{eff}$ :Color:[Fe/H] Calibrations // The Astrophysical Journal. — 2005. — ИЮНЬ. — Т. 626, № 1. — С. 465—485.
129. *Worthey G.* Comprehensive Stellar Population Models and the Disentanglement of Age and Metallicity Effects // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1994. — Ноябрь. — Т. 95. — С. 107.
130. New release of the ELODIE library: Version 3.1 / P. Prugniel [и др.] // arXiv e-prints. — 2007. — Март. — astro-ph/0703658.
131. Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra / P. Sánchez-Blázquez [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2006. — СЕНТ. — Т. 371, № 2. — С. 703—718.
132. The peculiar globular cluster Palomar 1 and persistence in the SDSS-APOGEE data base / F. Jahandar [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — ОКТ. — Т. 470, № 4. — С. 4782—4793.

133. Detailed Chemical Abundances of Four Stars in the Unusual Globular Cluster Palomar 1 / C. M. Sakari [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2011. — Окт. — Т. 740, № 2. — С. 106.
134. High resolution HDS/SUBARU chemical abundances of the young stellar cluster Palomar 1 / L. Monaco [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2011. — ЯНВ. — Т. 525. — A124.
135. The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters. XX. Ages of Single and Multiple Stellar Populations in Seven Bulge Globular Clusters / R. A. P. Oliveira [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2020. — Март. — Т. 891, № 1. — С. 37.
136. The Ages of 55 Globular Clusters as Determined Using an Improved  $\Delta V_{TO}^{HB}$  Method along with Color-Magnitude Diagram Constraints, and Their Implications for Broader Issues / D. A. Vandenberg [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2013. — Окт. — Т. 775, № 2. — С. 134.
137. *Valenti E., Origlia L., Rich R. M.* High-resolution near-infrared spectra of NGC 6624 and 6569 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2011. — Июль. — Т. 414, № 3. — С. 2690—2695.
138. *Bonatto C., Chies-Santos A. L.* Lifting the dust veil from the globular cluster Palomar 2 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Апр. — Т. 493, № 2. — С. 2688—2693.
139. FORS2/VLT survey of Milky Way globular clusters. II. Fe and Mg abundances of 51 Milky Way globular clusters on a homogeneous scale / B. Dias [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2016. — Май. — Т. 590. — A9.
140. *Pritzl B. J., Venn K. A., Irwin M.* A Comparison of Elemental Abundance Ratios in Globular Clusters, Field Stars, and Dwarf Spheroidal Galaxies // The Astronomical Journal. — 2005. — Ноябрь. — Т. 130, № 5. — С. 2140—2165.
141. *Marsakov V. A., Koval' V. V., Gozha M. L.* The Chemical Composition of Globular Clusters of Different Nature in Our Galaxy // Astronomy Reports. — 2019. — Апр. — Т. 63, № 4. — С. 274—288.
142. *Çalışkan Ş., Christlieb N., Grebel E. K.* Abundance analysis of the outer halo globular cluster Palomar 14 // Astronomy and Astrophysics. — 2012. — ЯНВ. — Т. 537. — A83.

143. Chemical abundances in the globular clusters NGC6229 and NGC6779 / D. A. Khamidullina [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2014. — Окт. — Т. 69, № 4. — С. 409—426.
144. Light and Heavy Element Abundance Variations in the Outer Halo Globular Cluster NGC 6229 / C. I. Johnson [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 2017. — Окт. — Т. 154, № 4. — С. 155.
145. Insights into the chemical composition of the metal-poor Milky Way halo globular cluster NGC 6426 / Hanke, M. [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2017. — Т. 599. — A97.
146. Exploring Anticorrelations and Light Element Variations in Northern Globular Clusters Observed by the APOGEE Survey / S. Mészáros [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 2015. — Май. — Т. 149, № 5. — С. 153.
147. NGC 6535: the lowest mass Milky Way globular cluster with a Na-O anticorrelation? Cluster mass and age in the multiple population context / A. Bragaglia [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2017. — Ноябрь. — Т. 607. — A44.
148. *Martell S. L., Smith G. H., Briley M. M.* Deep Mixing and Metallicity: Carbon Depletion in Globular Cluster Giants // *The Astronomical Journal*. — 2008. — Дек. — Т. 136, № 6. — С. 2522—2532.
149. Chemical analysis of NGC 6528: one of the most metal-rich bulge globular clusters / C. Muñoz [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Дек. — Т. 620. — A96.
150. *Koch A., Côté P.* An outer shade of Pal: Abundance analysis of the outer halo globular cluster Palomar 13 // *Astronomy and Astrophysics*. — 2019. — Дек. — Т. 632. — A55.
151. *Gratton R. G., Carretta E., Bragaglia A.* Multiple populations in globular clusters. Lessons learned from the Milky Way globular clusters // *The Astronomy and Astrophysics Review*. — 2012. — Т. 20. — С. 50.
152. A New Generation of PARSEC-COLIBRI Stellar Isochrones Including the TP-AGB Phase / P. Marigo [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — Янв. — Т. 835, № 1. — С. 77.

153. *Kaisler D., Harris W. E., McLaughlin D. E.* Palomar 10 and NGC 6749: A Study in Contrasts // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 1997. — Август. — Т. 109. — С. 920—926.
154. *Vasiliev E.* Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — Апрель. — Т. 484, № 2. — С. 2832—2850.
155. The Gaia mission / Gaia Collaboration [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2016. — Ноябрь. — Т. 595. — A1.
156. Gaia Early Data Release 3. Photometric content and validation / M. Riello [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2021. — Май. — Т. 649. — A3.
157. Palomar 1: Another Young Galactic Halo Globular Cluster? / A. Rosenberg [и др.] // The Astronomical Journal. — 1998. — Февр. — Т. 115, № 2. — С. 648—657.
158. Unveiling palomar 2: The most obscure globular cluster in the outer halo. / W. E. Harris [и др.] // The Astronomical Journal. — 1997. — Сентябрь. — Т. 114. — С. 1043—1050.
159. The Link between Chemical Anomalies along the Red Giant Branch and the Horizontal Branch Extension in Globular Clusters / E. Carretta [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2007. — Дек. — Т. 671, № 2. — С. L125—L128.
160. Milky Way Subsystems from Globular Cluster Kinematics Using Gaia DR2 and HST Data / A. T. Bajkova [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2020. — Май. — Т. 895, № 1. — С. 69.
161. *Bajkova A. T., Bobylev V. V.* Orbits of 152 globular clusters of the MilkyWay galaxy constructed from Gaia DR2 // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2021. — Август. — Т. 21, № 7. — С. 173.
162. *Massari D., Koppelman H. H., Helmi A.* Origin of the system of globular clusters in the Milky Way // Astronomy and Astrophysics. — 2019. — Октябрь. — Т. 630. — С. L4.
163. Properties of stellar generations in globular clusters and relations with global parameters / E. Carretta [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2010. — Июнь. — Т. 516. — A55.

164. *Salaris M., Weiss A.* Homogeneous age dating of 55 Galactic globular clusters. Clues to the Galaxy formation mechanisms // *Astronomy and Astrophysics*. — 2002. — ИЮНЬ. — Т. 388. — С. 492—503.
165. A CH star in the globular cluster NGC 6426 / M. Sharina [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — ОКТ. — Т. 426, № 1. — С. L31—L35.
166. The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters. I. Overview of the Project and Detection of Multiple Stellar Populations / G. Piotto [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 2015. — Март. — Т. 149, № 3. — С. 91.
167. Homogeneous metallicities and radial velocities for Galactic globular clusters. II. New CaT metallicities for 28 distant and reddened globular clusters / S. Vásquez [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — НОЯБ. — Т. 619. — A13.
168. Palomar 13: An Unusual Stellar System in the Galactic Halo / P. Côté [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — АВГ. — Т. 574, № 2. — С. 783—804.