

УДК 524.47-36

АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СПЕКТРОВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

© 2020 М. Е. Шарина^{1*}, В. В. Шиманский², Н. Н. Шиманская²¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 10 января 2020 года; после доработки 18 мая 2020 года; принята к публикации 18 мая 2020 года

Представлены результаты определения возраста, удельного содержания гелия Y , металличности $[Fe/H]$, и содержаний элементов C , O , Na , Mg , Ca , Ti , Cr и Mn для 26 шаровых скоплений Галактики. Применена разработанная нами оригинальная методика, использующая спектры умеренного разрешения интегрального излучения шаровых скоплений и модели звездных атмосфер и дополненная в данной работе автоматическим учетом скорости микротурбулентии при расчете спектров звезд скоплений. На материале данных, полученных для 26 объектов, а также результатов наших предыдущих работ показано, что определенные нами содержания элементов, за исключением углерода, согласуются с литературными оценками, полученными как по интегральным спектрам скоплений, так и по спектральным наблюдениям высокого разрешения их ярчайших звезд. Наши оценки $[C/Fe]$ согласуются с литературными, полученными по интегральным спектрам скоплений. Систематическое отличие в содержаниях $[C/Fe]$ скоплений от литературных данных для ярчайших звезд нами интерпретировано как эффект изменения химического состава атмосфер звезд в процессе их эволюции. Абсолютные оценки возраста и средние Y скоплений находятся в разумном согласии с литературными данными, полученными при исследованиях диаграмм «цвет—звездная величина» скоплений.

Ключевые слова: шаровые скопления: общие — шаровые скопления: химический состав — галактики

1. ВВЕДЕНИЕ

Свойства звездных населений шаровых скоплений всегда служили основанием для построения теорий звездной эволюции (Carnegie 2001, Kuijssen et al. 2019). Однако, несмотря на прогресс наблюдательной и теоретической астрофизики, определение абсолютных возрастов шаровых скоплений и содержания гелия в их звездах остается проблемой (см., например, Charbonnel (2016)). Особую сложность представляет объяснение явления множественности звездных населений шаровых скоплений (Gratton et al. 2012). Картина аномалий в содержаниях элементов C , N , O , Na , Al , Mg существенно меняется от скопления к скоплению. Общим является наличие антикорреляций в содержаниях легких элементов $C-N$, $Na-O$, $Mg-Al$. В некоторых массивных шаровых скоплениях обнаружены звездные популяции с разным обилием элементов r -процесса. Сложность объяснения этих явлений состоит в том, что изменения в содержаниях элементов, происходящие в процессе

эволюции звезд скоплений, накладываются на аномалии первичных содержаний, по-видимому, существовавшие на момент формирования скоплений (см. Kraft (1994), Charbonnel (2016) и ссылки в этой статье). Поэтому важно исследовать спектры именно интегрального излучения скоплений для того чтобы оценить, как особенности химического состава влияют на свойства суммарного излучения объектов. В первую очередь необходимо исследовать именно шаровые скопления нашей Галактики, для которых имеются данные глубокой звездной фотометрии и спектроскопии высокого разрешения отдельных звезд.

2. ВЫБОРКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основную часть выборки составляют шаровые скопления Галактики со спектрами умеренного разрешения интегрального излучения из библиотеки Schiavon et al. (2005). Спектры шаровых скоплений Галактики были получены в работе Schiavon et al. (2005) путем дрейфа щели спектрографа по ядерным частям скоплений. Спектры фона были получены аналогичным способом за пределами скоплений. Размеры сканированной области

*E-mail: sme@sao.ru

фона составили $5'–10'$. Для объектов NGC 6205 и NGC 7006 использованы архивные наблюдательные данные, полученные на 1.93-м телескопе в обсерватории Верхнего Прованса со спектрографом CARELEC. Аппаратурные условия при наблюдениях и методы обработки спектральных данных подробно описаны в наших предыдущих статьях: Sharina et al. (2013), Khamidullina et al. (2014) и Sharina et al. (2018). Качество звездных изображений было $2''–3''$ в период наблюдений NGC 6205 и NGC 7006 (9–10 июля 2010 г.). Спектры NGC 6205 и NGC 7006 были получены при фиксированных положениях щели. Для NGC 6205 наблюдения были выполнены в одном положении щели, проходящем вблизи центра скопления и ориентированном вдоль небесного меридиана (позиционный угол щели $PA = 0$). Экспозиция составила 300 с. Для вычитания фона была снята отдельная экспозиция с $PA = 0$ за пределами скопления. Для NGC 7006 была выполнена одна экспозиция с $PA = 0$ длительностью 900 с. Так как скопление имеет видимый диаметр примерно $2'$, для вычитания фона использовались участки полученного спектра выше и ниже объекта.

В данной статье определяются возраст, удельное содержание гелия Y , металличность $[Fe/H]$ и содержания элементов для 26 скоплений. В разделе 3.1 будет показано, что автоматический учет скоростей микротурбулентции существенно не меняет результаты. Поэтому в разделе 4.4 мы объединяем результаты исследования шаровых скоплений Галактики из наших предыдущих статей с данными, полученными в этой работе, чтобы на материале значительной выборки объектов показать, с какой точностью мы определяем вышеперечисленные параметры. Из предыдущих статей мы берем результаты для следующих объектов: NGC 2419 (Sharina et al. 2013), NGC 6229, NGC 6779, NGC 5904 (Khamidullina et al. 2014), NGC 1904, NGC 5286, NGC 6254, NGC 6752 и NGC 7089 (Sharina et al. 2017), NGC 104, NGC 6838, NGC 6121, NGC 6341 и NGC 7078 (Sharina et al. 2018). Таким образом, в разделе 4.4 мы анализируем результаты для 40 объектов. Отметим, что содержания химических элементов для объектов NGC 1851, NGC 2298, NGC 3201, NGC 6218, NGC 6342, NGC 6522, NGC 6624, исследованных в вышеупомянутых предыдущих работах, были изменены в данной статье в связи с усовершенствованием методики оценки ξ_{turb} . С литературными данными мы сравниваем 1) определения возраста и металличности скоплений по диаграммам «цвет–звездная величина», 2) определения металличности и содержаний элементов (Songou et al. 2018) с использованием спектров суммарного излучения шаровых скоплений Галактики из библиотеки Schiavon et al. (2005),

а также 3) определения содержаний элементов методами спектроскопии высокого разрешения.

3. МЕТОД

Метод исследования подробно описан в статьях Khamidullina et al. (2014), Sharina et al. (2014), Sharina and Shimansky (2020), Sharina et al. (2013; 2018; 2017). В работе Sharina et al. (2017) с его помощью впервые были проанализированы спектры внегалактических скоплений. Повторим основные детали метода. Мы анализируем спектры интегрального излучения шаровых скоплений с применением моделей звездных атмосфер для определения возраста, содержания гелия Y , металличности $[Fe/H]$ и оценки содержаний химических элементов в объектах исследования. Мы рассчитываем синтетические спектры на основе плоскопараллельных гидростатических моделей атмосфер (Castelli and Kurucz 2003). Списки атомарных и молекулярных спектральных линий взяты на веб-сайте R. L. Kurucz (<http://kurucz.harvard.edu/linelists.html>). Параметры атмосфер задаются изохронами звездной эволюции, а вычисленные синтетические спектры отдельных звезд суммируются согласно определенной функции масс. В данной работе мы рассчитываем синтетические спектры в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) и используем изохроны Bertelli et al. (2008) и функцию масс звезд Chabrier (2005).

Сравнение форм и интенсивностей наблюдаемых и модельных абсорбционных линий бальмеровской серии водорода и интенсивностей линий Ca I 4227, K и H Ca II 3933.7 Å и 3968.5 Å¹ позволяет определять изохрону, наилучшим образом воспроизводящую наблюдаемый спектр. Влияние возраста и Y на спектр не эквивалентно. Температура звезд точки поворота главной последовательности (ГП) повышается с уменьшением возраста. Одновременно увеличиваются глубины ядер и крыльев водородных линий. Увеличение Y приводит к повышению средней светимости и температуры звезд горизонтальной ветви (ГВ). Интенсивности и ширины профилей водородных линий показывают максимальную зависимость от светимости у звезд спектрального класса A0 ($8700 \leq T_{\text{eff}} \leq 11\,000$ K). При дальнейшем росте температуры и светимости водородные линии ослабевают вследствие интенсивной ионизации водорода. Этот процесс развивается достаточно медленно, так как убывание коэффициентов поглощения в бальмеровских линиях водорода частично компенсируется уменьшением непрозрачности в окружающем пашеновском континууме.

¹В линию H Ca II вносит вклад линия водорода H ϵ .

При изменении металличности, возраста и Y глубина ядер и крыльев каждой из водородных линий $H\delta$, $H\gamma$ и $H\beta$ изменяются по-разному из-за различного вклада звезд разной светимости и спектральных классов в зависимости от длины волны. Этот факт позволяет достаточно уверенно определять металличность, возраст и Y . Ионизационный баланс $Ca\ I/Ca\ II$, о котором речь шла выше, зависит от температуры и плотности среды. Поэтому он является важным дополнительным контрольным индикатором, позволяющим проверять параметры, полученные по линиям водорода, и уточнять их при необходимости.

Поскольку параметры атмосфер задаются изохронами звездной эволюции, важно проверить в целях тестирования метода, соответствуют ли подобранные с помощью анализа спектров суммарного излучения скоплений модели звездной эволюции наблюдаемому положению звезд на диаграммах «цвет—звездная величина» (CMD) этих объектов. Эта задача выполнена нами для всех исследованных скоплений Галактики. Методы анализа CMD подробно описаны нами в статье Khamidullina et al. (2014). Так как из анализа спектров мы уже знаем возраст, Y и металличность скопления, то в процессе «подгонки» изохроны остается подобрать только расстояние до объекта и избыток цвета $E(B - V)$ по картам поглощения света (Schlegel et al. 1998) в Галактике. В целях тестирования метода Khamidullina et al. (2014) решали также задачу подбора пяти параметров по CMD: возраста, Y , металличности, $E(B - V)$ и расстояния до скопления. Однако в настоящей работе этот подход не применяется.

Таким образом, в этой статье мы приводим результаты моделирования спектров интегрального излучения 26 галактических шаровых скоплений и сравнение результатов с литературными значениями. Главной целью исследования в рамках данной работы является дальнейшее совершенствование нашего метода. По сравнению с нашими предыдущими работами мы применяем новый подход к вычислению скорости микротурбулентции.

3.1. Скорость микротурбулентции

В серии наших предыдущих исследований интегральных спектров скоплений скорость микротурбулентции (ξ_{turb} , км с⁻¹) (Khamidullina et al. 2014, Sharina et al. 2014; 2013; 2018; 2017) выбиралась единой для всех звезд скопления на основе наилучшего соответствия теоретических и наблюдательных данных. Однако такой подход является априори некорректным, так как в условиях разнообразия параметров звезд значения ξ_{turb} внутри скопления изменяются в больших пределах. Поэтому нами разработана и реализована методика

автоматического выбора ξ_{turb} при расчете синтетических спектров звезд. Нашей целью является учет реальных вариаций значений ξ_{turb} в скоплениях и уменьшение числа свободных параметров при анализе интегральных спектров. В рамках данной методики построена зависимость ξ_{turb} от основных параметров звездных атмосфер: эффективной температуры T_{eff} и силы тяжести на поверхности звезды $\lg g$. Для построения зависимости использовались наблюдаемые параметры звезд по данным из литературы. В анализируемую выборку для диапазонов параметров нами включено 637 объектов из комплексных спектроскопических исследований звезд (Bruntt et al. 2012, Kahraman Aliçavuş et al. 2016, Menzhevitski et al. 2014, Santos et al. 2013, Schaeuble et al. 2015), где скорости микротурбулентции определены из анализа линий Fe I и Fe II методом моделей атмосфер с выполнением стандартного условия отсутствия зависимости содержания железа от эквивалентных ширин отдельных линий. Значения ξ_{turb} , полученные в литературе с использованием разных методов, не показали значимых различий для звезд одного и того же спектрального класса. Кроме того, оказалось, что характер зависимости ξ_{turb} от T_{eff} и $\lg g$ гладкий при переходе от одного спектрального класса к другому, что позволило описать ее полиномом третьей степени:

$$\xi_{\text{poly}} = \sum_{i,j=0}^3 a_{ij} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{1000 \text{ K}} \right)^i (\lg g)^j, \quad (1)$$

где коэффициенты, вычисленные с применением метода наименьших квадратов, представлены в таблице 1. Подобное соотношение строилось Voeche and Grebel (2016), но для более узкого диапазона параметров: T_{eff} и ξ_{turb} . Аппроксимация наблюдаемых данных в работе Voeche and Grebel (2016) выполнена полиномом второй степени с учетом всех перекрестных компонент. Ранее Voeche et al. (2011) строили зависимость ξ_{turb} от T_{eff} и $\lg g$ с помощью полинома третьей степени. Помимо исследований Voeche et al. (2011) и нашего, в литературе нет аналогов построения трехмерной зависимости для звезд в широком диапазоне T_{eff} и $\lg g$ (см. Voeche et al. (2011), Larsen et al. (2012), Malavolta et al. (2014), Marino et al. (2008), McWilliam and Bernstein (2008), Nissen (1981) и ссылки в этой статье.)

Для получения нами устойчивого решения задавались следующие граничные условия: $\xi_{\text{turb}} = 0.55$ км с⁻¹ при $T_{\text{eff}} = 4000$ К, $\lg g = 5.0$ и $\xi_{\text{turb}} = 7.0$ км с⁻¹ при $T_{\text{eff}} = 10000$ К, $\lg g = 0.5 - 1.0$ (Galazutdinov et al. 2017) путем добавления искусственных точек с соответствующими величинами T_{eff} , $\lg g$ и ξ_{turb} и специально подобранными весами.

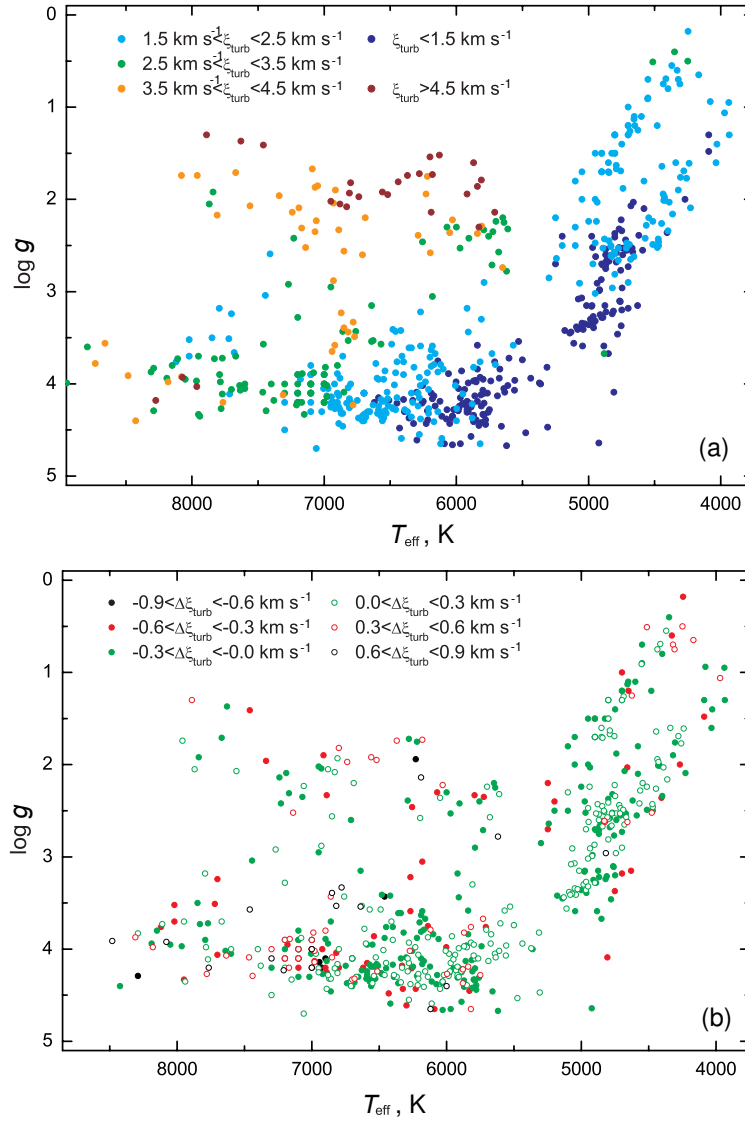


Рис. 1. Панель (а): распределение 637 звезд выборки на плоскости $T_{\text{eff}} - \lg g$. Указаны интервалы ξ_{turb} , в которые попадают объекты. Панель (б): распределение на плоскости $T_{\text{eff}} - \lg g$ 607 звезд выборки, оставленных после процедуры селекции (см. раздел 3.1) и использованных для построения зависимости (1) с указанием интервалов по отклонению вычисленных нами ξ_{turb} от соответствующих литературных значений.

Таблица 1. Коэффициенты полиномиальной трехмерной зависимости ξ_{turb} от T_{eff} и $\lg g$.

	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}
a_{0j}	0.943161	0.296562	$2.47216\text{E} - 2$	$-1.69846\text{E} - 3$
a_{1j}	-0.154776	-0.128602	$1.38775\text{E} - 2$	$-5.05178\text{E} - 4$
a_{2j}	0.106128	$-3.58510\text{E} - 2$	$4.91499\text{E} - 3$	$-1.43992\text{E} - 4$
a_{3j}	$-9.99955\text{E} - 3$	$5.57946\text{E} - 3$	$-9.46429\text{E} - 4$	$3.54326\text{E} - 5$

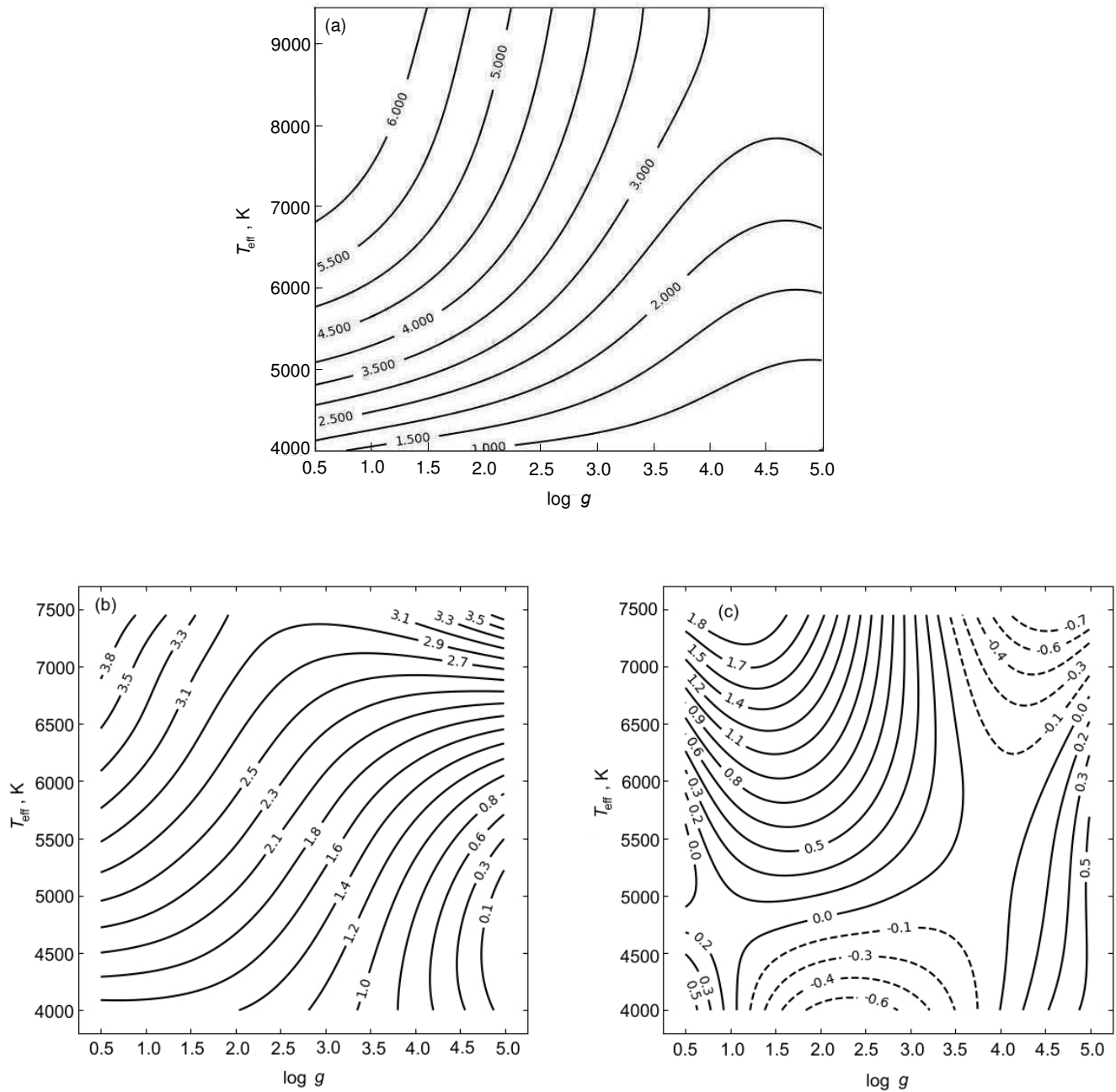


Рис. 2. Сравнение полученных нами и Voeche and Grebel (2016) распределений значений ξ_{turb} в изолиниях на плоскости $T_{\text{eff}} - \lg g$. Панель (a): распределение значений ξ_{turb} , полученных с помощью зависимости (1). Панель (b): распределение Voeche and Grebel (2016) значений ξ_{turb} . Панель (c): разница $\Delta\xi_{\text{turb}}$ (в km s^{-1}) между значениями ξ_{turb} по нашим оценкам и из работы Voeche and Grebel (2016). Изолинии с отрицательными $\Delta\xi_{\text{turb}}$ показаны пунктиром.

Набор наблюдаемых значений аппроксимировался двумерным многочленом, в котором коэффициенты при всех степенях компонент по T_{eff} и $\lg g$ (включая перекрестные) вычислялись с применением метода наименьших квадратов. Глобальный минимум суммы квадратов уклонений взвешенных наблюдаемых ξ_{turb} и аппроксимационных ξ_{poly} значений скорости микротурбулентности находился путем ее дифференцирования по всем коэффициен-

там многочлена с формированием для них связанной системы линейных уравнений

$$\frac{d(w(\xi_{\text{turb}} - \xi_{\text{poly}})^2)}{d(a_{ij})} = 0 \quad i, j = 0 - 3, \quad (2)$$

где w — вес, ξ_{turb} — значение скорости микротурбулентности из литературы, ξ_{poly} — заданное полиномом значение скорости микротурбулентности, a_{ij} — коэффициенты полинома (см. таблицу 1). В про-

цессе аппроксимации проводилась итерационная отбраковка наблюдаемых значений, уклоняющихся от многочлена на величину более 3σ текущей дисперсии. Кроме того, каждой точке присваивался вес w , равный $\frac{1}{\sqrt{n_{\text{loc}}}}$, где n_{loc} определялось числом точек в секторах с $\Delta T_{\text{eff}} = 500$ К и $\Delta \lg g = 0.5$. В результате по оставленным ($N = 607$) звездам получено единое гладкое распределение ξ_{turb} для диапазонов $T_{\text{eff}} = 4000\text{--}10\,000$ К и $\lg g = 0.5\text{--}5.0$ со среднеквадратичной ошибкой 0.27 км с⁻¹ и отсутствием зависимости данной ошибки от параметров атмосфер.

На рис. 1а показано положение всех 637 звезд выборки на плоскости $T_{\text{eff}}\text{--}\lg g$ с указанием интервалов ξ_{turb} , в которые попадают объекты. Рисунок 1б демонстрирует распределение на плоскости $T_{\text{eff}}\text{--}\lg g$ ($N = 607$) звезд выборки, использованных для построения зависимости (1) с указанием интервалов по отклонению вычисленных нами ξ_{turb} от соответствующих литературных значений из наблюдений: $\Delta\xi_{\text{turb}} = \xi_{\text{turb}}^{\text{our}} - \xi_{\text{turb}}^{\text{obs}}$. Нами учтено относительно небольшое число холодных $T_{\text{eff}} < 5500$ К звезд ГП. Однако имеющиеся вариации ξ_{turb} в атмосферах таких звезд (не более $\Delta\xi_{\text{turb}} = 0.3$ км с⁻¹) и наличие жестко фиксированного значения при $T_{\text{eff}} = 4000$ К, $\lg g = 5.0$ позволяет вычислять скорость микротурбулентции со средней ошибкой менее 0.27 км с⁻¹. В частности, для атмосферы Солнца построенное нами распределение предсказывает значение $\xi_{\text{turb}} = 1.12$ км с⁻¹, что на 0.22 км с⁻¹ больше общепринятого значения. Максимальная плотность учитываемых нами точек наблюдается в области звезд ГП с $5500 < T_{\text{eff}} < 7000$ К, красных субгигантов и гигантов, что обеспечивает среднюю ошибку аппроксимации для них около 0.22 км с⁻¹. Плотность точек в областях звезд более высокой температуры и светимости значительно ниже, а наблюдаемые значения ξ_{turb} в них часто варьируются до $\Delta\xi_{\text{turb}} = 0.8$ км с⁻¹ даже при близких величинах параметров атмосфер. Поэтому среднеквадратичное отклонение вычисленных ξ_{turb} от соответствующих наблюдаемых значений в этих областях превышают 0.3 км с⁻¹. Наибольшая амплитуда уклонений $\Delta\xi_{\text{turb}} = 0.39$ км с⁻¹ наблюдается на участке ГП с температурами $6900 < T_{\text{eff}} < 7600$ К и может быть связана со включением в исследование нескольких Am-звезд с низкой турбулентностью. В целом мы можем сделать вывод о том, что полученное распределение позволяет с наилучшей точностью определять значения ξ_{turb} для групп звезд, дающих основной вклад в интегральные спектры шаровых скоплений (F- и G-карлики ГП, субгиганты и красные гиганты).

На рис. 2а изолиниями представлено распределение значений ξ_{turb} , полученных с помощью зависимости (1), для всего рассматриваемого диапазона параметров T_{eff} и $\lg g$. Оно характеризуется наличием ожидаемого систематического роста скорости микротурбулентции с повышением эффективной температуры и светимости звезд. Использование нами аппроксимирующего полинома невысокой степени позволило исключить мелкомасштабные флуктуации значений ξ_{turb} , наблюдаемые на рис. 1 в области горячих звезд и, вероятно, обусловленные методическими различиями при определении ξ_{turb} в разных работах.

На рис. 2б изолинии показывают распределение ξ_{turb} на плоскости $T_{\text{eff}}\text{--}\lg g$ согласно аппроксимации ξ_{turb} из работы Voeche and Grebel (2016), а на рис. 2с — разницу между нашим распределением значений ξ_{turb} и полученным Voeche and Grebel (2016).

Распределение значений ξ_{turb} для выборки Voeche and Grebel (2016) (в отличие от нашего) имеет следующие существенные свойства: 1) звезды в основном сконцентрированы на ГП в диапазоне температур $5000 < T_{\text{eff}} < 6500$ К и на ветвях красных субгигантов и гигантов с $1.5 < \lg g < 3.5$; 2) имеется десять звезд с температурами $6500 < T_{\text{eff}} < 7000$ К; 3) область F-гигантов и сверхгигантов содержит 20 объектов с параметрами в диапазонах $5600 < T_{\text{eff}} < 6600$ К, $1.0 < \lg g < 2.6$; 4) отсутствуют данные в промежутках между указанными областями, а также для температур выше $T_{\text{eff}} = 7000$ К.

Необходимо отметить, что распределение ξ_{turb} , построенное в статье Voeche and Grebel (2016), показывает рост значений скорости микротурбулентции с повышением температуры и светимости звезд, близкий к найденному в нашей работе. В результате вышеназванных различий по свойствам используемых наблюдательных параметров и подходам к аппроксимации их распределения, наше и Voeche and Grebel (2016) распределения ξ_{turb} имеют наилучшее согласие в области наибольшей плотности данных в исследовании Voeche and Grebel (2016): на холодной части ГП и ветви красных субгигантов и гигантов, где различия значений ξ_{turb} не превышают 0.3 км с⁻¹. Отметим, что в данных областях наше распределение показывает в среднем более низкие (на $0.05\text{--}0.15$ км с⁻¹) значения скорости микротурбулентции, чем распределение Voeche and Grebel (2016). Вне этой области различия двух распределений быстро нарастают до 0.4 км с⁻¹ для наиболее ярких красных гигантов, до 0.5 км с⁻¹ для звезд ГП с температурой $T_{\text{eff}} > 7000$ К и до 1.9 км с⁻¹ для F-сверхгигантов. Данные различия обусловлены ограниченным набором значений ξ_{turb} в исследовании Voeche and

Grebel (2016), которые в перечисленных областях либо малочисленны, либо полностью отсутствуют. Для звезд ГП с температурой $T_{\text{eff}} < 5000$ К распределение Voeche and Grebel (2016) может давать близкие к нулю или отрицательные величины ξ_{turb} из-за отсутствия фиксированного граничного значения. В итоге можно сделать вывод о том, что построенная нами зависимость скорости микротурбулентии от параметров атмосфер обеспечивает получение корректных оценок ξ_{turb} в широких диапазонах T_{eff} и $\lg g$. В областях F- и G-карликов, красных субгигантов и гигантов результаты применения нашей и Voeche and Grebel (2016) зависимостей соответствуют друг другу в пределах ошибок их построения.

Полученная нами зависимость (1) интегрирована в программу расчета спектров суммарного излучения скоплений. При выходе любого из параметров за пределы диапазона в качестве значения ξ_{turb} принимается его оценка в ближайшей граничной точке. Использование данного распределения при моделировании спектров шаровых скоплений NGC 6254 и NGC 6341 предопределило средние значения скорости микротурбулентии на длинах волн $\lambda 5000\text{--}5900$ Å: $\xi_{\text{turb}} = 1.86$ км с⁻¹ и $\xi_{\text{turb}} = 1.88$ км с⁻¹, которые в пределах 0.20 км с⁻¹ совпадают с постоянными для спектров скоплений значениями ξ_{turb} , найденными в прежних наших работах для NGC 6254 и NGC 6341 (Khamidullina et al. 2014, Sharina et al. 2018; 2017).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Результаты определения возраста, Y , $[Fe/H]$ и содержаний химических элементов для шаровых скоплений Галактики

В таблице 2 представлены литературные данные для объектов исследования, полученные по CMD: металличность, возраст, Y , избыток цвета и видимый модуль расстояния, не исправленный за поглощение света в Галактике. В той же таблице приведены полученные в данной работе избыток цвета и исправленные за поглощение модули расстояния скоплений, полученные при адаптации изохрон Bertelli et al. (2008), подобранных с помощью исследования интегральных спектров скоплений, к распределению звезд на CMD скоплений. В последней колонке таблицы указаны параметры изохрон (Bertelli et al. 2008), использованных при моделировании спектров скоплений.

Определенные с помощью анализа спектров суммарного излучения возраст, массовая доля гелия Y , металличность $[Fe/H]$ и содержания элементов C, O, Na, Mg, Ca, Ti, Cr и Mn для

тестовой выборки шаровых скоплений Галактики приведены в таблице 3 и на рис. 3, 4 и 5. Типичные ошибки измерения параметров с помощью нашего метода для спектров с отношением $S/N \sim 100$ и отсутствием вклада от фоновых звезд следующие: $\sigma[C/Fe] \sim 0.2$ dex, $\sigma[O/Fe] = 0.3$ dex, $\sigma[Na/Fe] \sim 0.2$ dex, $\sigma[Mg/Fe] \sim 0.15$ dex, $\sigma[Ca/Fe] \sim 0.1$ dex, $\sigma[Ti/Fe] \sim 0.2$ dex, $\sigma[Cr/Fe] \sim 0.2$ dex, $\sigma[Mn/Fe] \sim 0.2$ dex, $\sigma[Fe/H] \sim 0.1$ dex. Точность определения возраста и Y примерно соответствует половине шага используемых моделей звездной эволюции по этим параметрам (см. Khamidullina et al. (2014), Sharina et al. (2014; 2013; 2018; 2017)). Необходимо отметить, что линии кислорода слишком слабы и не видны в спектре при используемых нами спектральном диапазоне и разрешении. Однако содержание кислорода влияет на формирование молекулярного баланса CN и CH вследствие частичного связывания углерода в молекулу CO. Мы обычно задавали $[O/Fe] = 0.3$, когда приступали к моделированию спектров. В некоторых случаях это содержание приходилось немного менять (таблица 3), чтобы корректно описывались профили молекулярных полос CN и CH, на интенсивность которых, помимо C, N и O, влияют также линии других элементов.

На рис. 4 и 5 показано сравнение определенных нами для скоплений содержаний элементов и возраста с соответствующими литературными значениями. Литературные значения $[Fe/H]$ мы брали в основном из работ VandenBerg et al. (2013) и Harris (1996). Для NGC 6624, NGC 6341, NGC 6637 и NGC 6652 значения $[Fe/H]$ взяты из статьи Forbes and Bridges (2010), а для NGC 6779 — из Dotter et al. (2010), оценки содержаний элементов — из исследований Pritzl et al. (2005) и Roediger et al. (2014). Недостающие данные о содержаниях элементов нами были найдены в следующих статьях: Johnson et al. (2017) для NGC 5986; Mészáros et al. (2015) для NGC 6171 и NGC 6205; Yong et al. (2014) для NGC 6266 и Massari et al. (2017) для NGC 6362.

4.2. Сравнение наблюдаемых и синтетических спектров суммарного излучения скоплений

Сравнение наблюдаемых спектров 26 шаровых скоплений Галактики из работы Schiavon et al. (2005) и архивных спектральных данных ОНР с синтетическими спектрами, рассчитанными с помощью моделей звездных атмосфер, а также сравнение литературных данных фотометрии звезд в этих шаровых скоплениях (Piotto et al. 2002, Sarajedini et al. 2007) с изохронами звездной эволюции, подобранными исходя из наилучшего

Таблица 2. Характеристики шаровых скоплений Галактики по данным из литературы и по нашим оценкам с помощью анализа результатов звездной фотометрии: (2) металличность из Harris (1996) (H); (3) металличность из VandenBerg et al. (2013) (V); (4)–(7) возраст, удельное содержание гелия Y , видимый модуль расстояния, галактическое поглощение (избыток цвета) по данным VandenBerg et al. (2013) (или при отсутствии таковых — из Harris (1996) (H), Kruijssen et al. (2019) (K) и Testa et al. (2001) (T)). В последних трех колонках показаны наши результаты: модуль расстояния, исправленный за поглощение света в Галактике, избыток цвета и использованные при моделировании спектра параметры изохроны (Bertelli et al. 2008): металличность Z , массовая доля гелия Y и логарифм возраста в млрд. лет. Если спектр скопления может быть адекватно описан с помощью двух изохрон, индекс «CMD» указывает на изохрону, лучше описывающую CMD скопления.

Parameter/ Object	[Fe/H] ^H , dex (2)	[Fe/H] ^V , dex (3)	T^V , Gyr (4)	Y^V	$(m - M)^V$, mag (6)	$E(B - V)^V$, mag (7)	$(m - M)_0^{our}$, mag (8)	$E(B - V)^{our}$, mag (9)	Isochrone (10)
NGC 1851	-1.22	-1.18	11.00	0.25	15.43	0.034	15.25	0.04	0.0010, 0.26, 10.10
NGC 2298	-1.85	—	12.84 ^K	—	—	—	14.9	0.23	0.0004, 0.26, 10.05
NGC 2808	-1.15	-1.18	11.00	0.25	15.53	0.227	14.6	0.2	0.0004, 0.30, 10.15
	-1.15	-1.18	11.00	0.25	15.53	0.227	14.85	0.21	0.0010, 0.30, 10.15 ^{CMD}
NGC 3201	-1.58	-1.51	11.50	0.25	14.10	0.28	13.3	0.26	0.0004, 0.30, 10.10
NGC 5946	-1.38	—	11.39 ^K	—	—	—	14.8–14.9	0.13	0.0004, 0.26, 10.15
NGC 5986	-1.58	-1.63	12.50	0.25	—	—	15.45–15.4	0.305	0.0001, 0.30, 10.05
NGC 6171	-1.04	-1.03	12.00	0.25	14.82	0.435	14.03	0.42	0.0010, 0.26, 10.0
NGC 6218	-1.48	-1.33	13.00	0.25	14.05	0.225	13.75	0.205	0.0004, 0.26, 10.10
	-1.48	-1.33	13.00	0.25	14.05	0.225	13.55	0.18	0.0010, 0.26, 10.15 ^{CMD}
NGC 6235	-1.40	—	11.39 ^K	—	16.41 ^H	0.36 ^H	15.20	0.38	0.0010, 0.30, 10.10 ^{CMD}
	-1.40	—	11.39 ^K	—	16.41 ^H	0.36 ^H	15.20	0.33	0.0004, 0.26, 10.15 ^{CMD}
NGC 6266	-1.29	—	11.78 ^K	—	15.64 ^H	0.47 ^H	14.07	0.09	0.0004, 0.30, 10.15
NGC 6284	-1.32	—	11.14 ^K	—	16.80 ^H	0.28 ^H	15.80	0.37	0.0004, 0.30, 10.10
NGC 6333	-1.75	—	—	—	15.66 ^H	0.38 ^H	—	—	0.0004, 0.26, 10.10
NGC 6342	-0.65	—	12.03 ^K	—	16.1 ^H	0.46 ^H	14.90	0.55	0.0020, 0.30, 10.0
NGC 6362	-0.95	-1.07	12.50	0.25	14.58	0.076	14.46	0.08	0.0010, 0.30, 10.15
NGC 6441	-0.53	—	11.26 ^K	—	16.79 ^H	0.47 ^H	16.0	0.49	0.0010, 0.26, 10.0 ^{CMD}
	-0.53	—	11.26 ^K	—	16.79 ^H	0.47 ^H	15.7	0.49	0.0010, 0.30, 10.15
NGC 6522	-1.44	—	—	—	15.94 ^H	0.48 ^H	14.57	0.10	0.0004, 0.30, 10.10 ^{CMD}
	-1.44	—	—	—	15.94 ^H	0.48 ^H	14.57	0.03	0.0010, 0.26, 10.10
NGC 6544	-1.56	—	10.37 ^K	—	14.43 ^H	0.73 ^H	11.90	0.17	0.0001, 0.30, 10.15
NGC 6569	-0.86	—	—	—	16.85 ^H	0.55 ^H	15.10	0.06	0.0010, 0.23, 10.15
	0.86	—	—	—	16.85 ^H	0.55 ^H	15.25	0.06	0.0010, 0.26, 10.05 ^{CMD}
NGC 6624	-0.42	-0.42	11.25	0.25	15.28	0.268	14.70	0.30	0.0010, 0.23, 10.15
NGC 6626	-1.45	—	13–14	0.23 ^T	14.97 ^H	0.40 ^H	13.87	0.38	0.0010, 0.30, 10.10
NGC 6637	-0.70	-0.59	11.00	0.25	15.23	0.163	14.80	0.18	0.0020, 0.23, 10.10
NGC 6638	0.99	—	—	—	16.15 ^H	0.40 ^H	14.7	0.07	0.0010, 0.30, 10.15
NGC 6652	-0.96	-0.76	11.25	0.25	15.3 ^H	0.09 ^H	14.85	0.13	0.0020, 0.26, 10.15
NGC 6723	-1.12	-1.10	12.50	0.25	14.73	0.07	14.65	0.09	0.0010, 0.26, 10.10
NGC 6205	-1.54	-1.58	12.00	0.25–0.33	14.45	0.017	14.6	0.04	0.0004, 0.30, 10.0
NGC 7006	-1.63	—	12.25 ^K	—	18.24 ^H	0.05 ^H	17.94	0.09	0.0004, 0.26, 10.15

Таблица 3. Возраст в млрд. лет, Y , металличность и содержания химических элементов, полученные нами для шаровых скоплений Галактики при моделировании их спектров суммарного излучения. Индексом «b» обозначены скопления, принадлежащие балджу, согласно Vica et al. (2016). Для NGC 5986 и NGC 6441 получено по два варианта полного набора параметров. Для NGC 5946, NGC 6235, NGC 6522, NGC 6569 расчеты с двумя изохронами дают одинаковые в пределах ошибок содержания (см. таблицу 2 и текст).

Parameter/ Object	T_{sp}^{our} , Gyr	Y_{sp}^{our}	[Fe/H], dex	[C/Fe], dex	[O/Fe], dex	[Na/Fe], dex	[Mg/Fe], dex	[Ca/Fe], dex	[Ti/Fe], dex	[Cr/Fe], dex	[Mn/Fe], dex
NGC 1851	12.6	0.26	-1.60	0.00	0.40	0.35	0.51	0.35	0.45	0.10	-0.10
NGC 2298	11.2	0.26	-2.20	0.15	0.50	0.40	0.40	0.45	0.20	0.30	0.20
NGC 2808	13.6	0.30	-1.30	-0.35	0.10	0.45	0.20	0.15	0.05	0.00	0.00
NGC 3201	12.6	0.30	-1.50	-0.10	0.30	0.20	0.20	0.10	0.10	0.00	0.00
NGC 5946	12.6, 13.6	0.26	-1.95	0.15	0.55	0.45	0.45	0.35	0.35	0.15	-0.05
NGC 5986	12.5	0.30	-1.75	-0.10	0.30	0.00	0.25	0.15	0.10	0.20	0.20
	11.2	0.30	-1.75	-0.17	0.30	0.00	0.20	0.18	0.10	0.25	0.00
NGC 6171	10	0.26	-1.25	0.11	0.30	0.20	0.50	0.21	-0.50	0.25	-0.50
NGC 6218	12.6, 13.6	0.26	-1.80	0.15	0.50	-0.1	0.50	0.35	-0.40	-0.20	-0.50
NGC 6235	12.6, 13.6	0.26, 0.30	-1.50	-0.10	0.30	0.20	-0.05	0.10	-0.10	0.00	-0.20
NGC 6266	13.6	0.30	-1.50	-0.10	0.30	0.20	0.35	0.25	-0.30	0.30	-0.40
NGC 6284	12.6	0.30	-1.40	-0.10	0.30	0.50	0.50	0.30	0.10	0.20	-0.30
NGC 6333	12.6	0.26	-2.30	-0.07	0.30	0.20	0.30	0.45	0.30	0.20	0.00
NGC 6342 ^b	12.6	0.23	-0.90	0.10	0.30	0.20	0.50	0.00	-0.50	-0.10	-0.30
NGC 6362 ^b	13.6	0.30	-1.45	-0.10	0.30	0.50	0.40	0.20	0.05	0.20	-0.30
NGC 6441	10.0	0.26	-0.90	0.10	0.35	0.40	0.60	0.30	0.15	0.20	-0.20
	13.6	0.30	-0.95	0.00	0.30	0.20	0.40	0.30	0.10	0.00	0.00
NGC 6522 ^b	12.6	0.30, 0.26	-1.45	-0.10	0.30	0.20	0.60	0.20	0.30	0.10	0.20
NGC 6544	13.6	0.30	-1.80	-0.20	0.30	0.20	0.20	-0.1	0.10	0.00	0.00
NGC 6569	13.6, 11.2	0.23, 0.26	-1.20	0.20	0.30	0.40	0.60	0.20	0.40	0.20	0.00
NGC 6624 ^b	13.6	0.23	-1.00	0.18	0.30	0.40	0.60	0.25	0.50	0.00	-0.40
NGC 6626 ^b	12.6	0.30	-1.50	-0.30	0.30	0.45	0.30	0.20	0.35	0.10	-0.50
NGC 6637 ^b	12.6	0.23	-1.00	-0.10	0.30	0.10	0.50	0.05	0.22	0.20	-0.30
NGC 6638	13.6	0.30	-1.15	0.27	0.30	0.20	0.50	0.37	0.00	0.05	-0.50
NGC 6652	13.6	0.26	-1.20	0.20	0.30	0.45	0.40	0.30	-0.10	-0.35	-0.35
NGC 6723 ^b	12.6	0.26	-1.40	0.05	0.30	0.50	0.40	0.35	0.15	-0.20	-0.30
NGC 6205	10.0	0.30	-1.70	-0.12	0.30	0.70	0.20	0.20	0.30	-0.20	0.00
NGC 7006	13.6	0.26	-1.80	-0.07	0.45	0.40	0.27	0.20	0.05	-0.25	-0.05

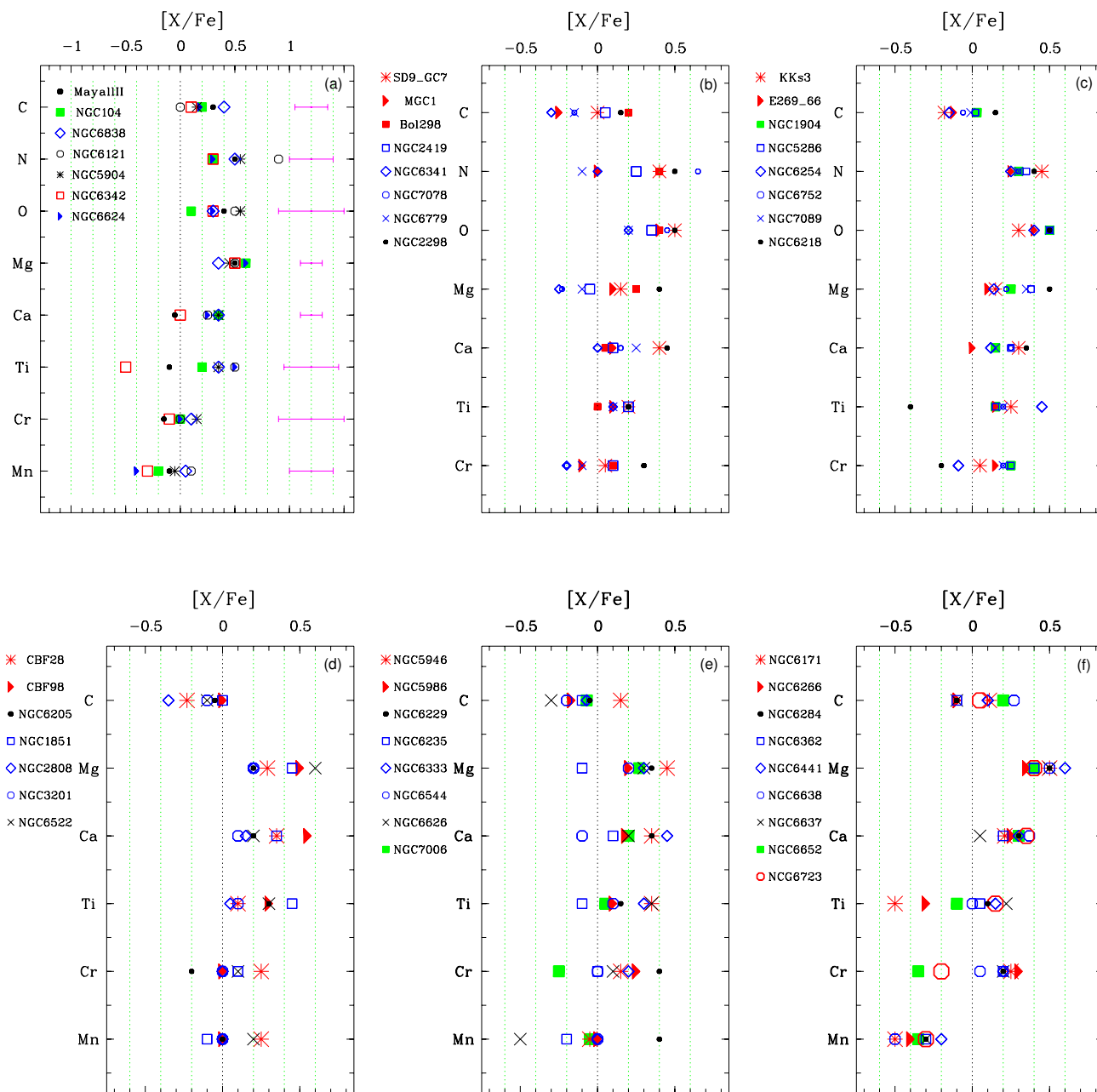


Рис. 3. Полученные с помощью нашего метода содержания химических элементов с использованием определенных нами эволюционных параметров (таблица 3). Объекты сгруппированы согласно величине $[Fe/H]$. Типичные ошибки содержаний показаны на панели (a).

описания линий водорода в спектрах моделями, представлено на ftp-сайте CAO². В данной работе мы приводим сравнение для одного объекта — NGC 1851. На рис. 6 (верхняя панель) показано сравнение результатов фотометрии Sarajedini et al. (2007) с двумя изохронами Bertelli et al. (2008),

подобранными исходя из наилучшего описания линий водорода модельными. Обе изохроны правильно описывают распределение звезд на CMD, за исключением стадии ГВ. Горизонтальная ветвь не описывается точно ни в том, ни в другом случае. Сравнение профилей водородных линий в наблюдаемом и синтетических спектрах (рис. 6, нижняя панель), рассчитанных с использованием

²ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/AnalILMWGCs/

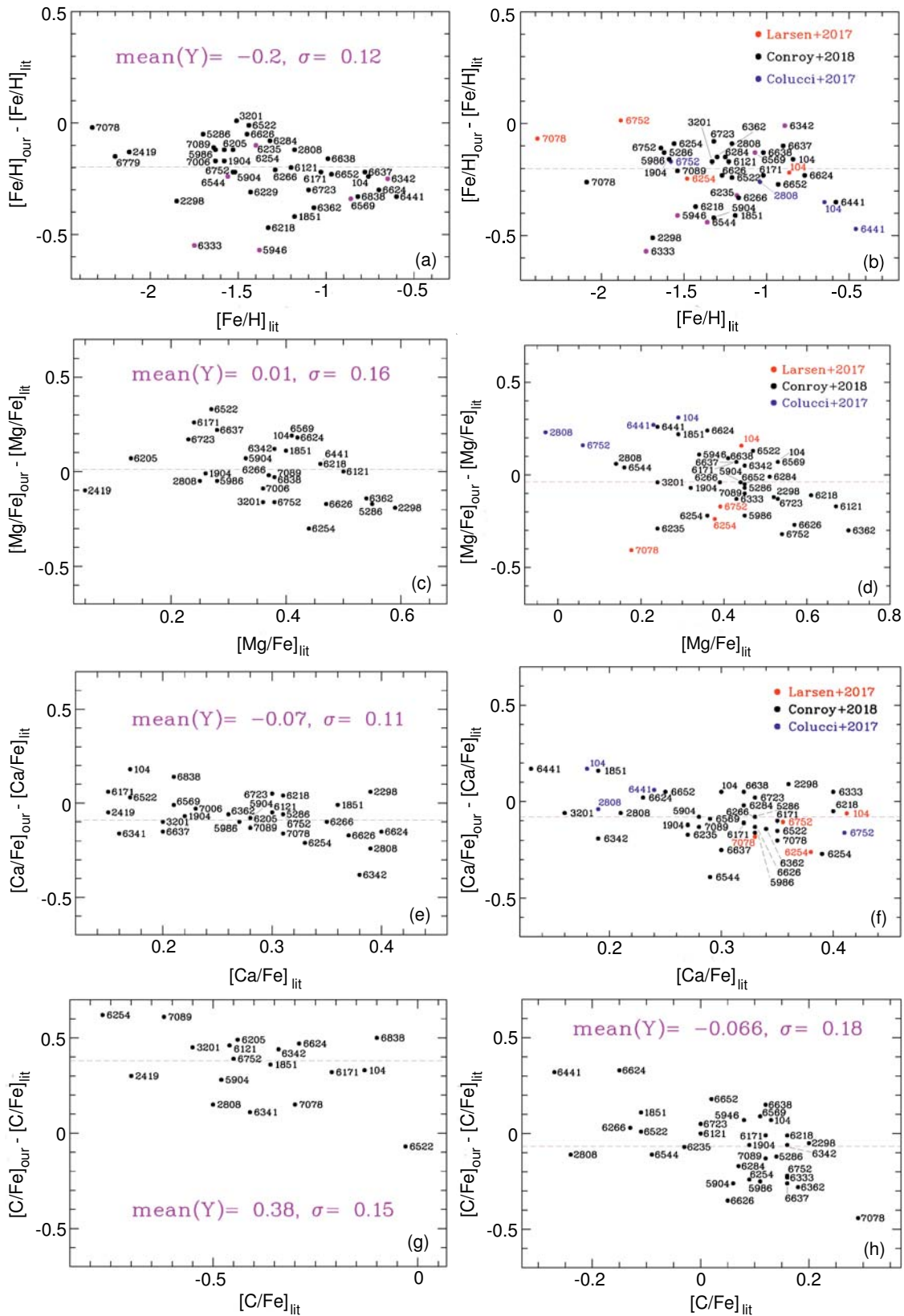


Рис. 4. Сравнение содержаний химических элементов, определенных нами для шаровых скоплений Галактики с данными из литературы (см. ссылки в тексте), полученными с использованием спектров высокого разрешения (левые панели) и спектров интегрального излучения этих объектов (правые панели). Зелеными кружками на верхних панелях отмечены объекты с относительно низким отношением S/N в спектрах. На рисунке приведены NGC-номера скоплений.

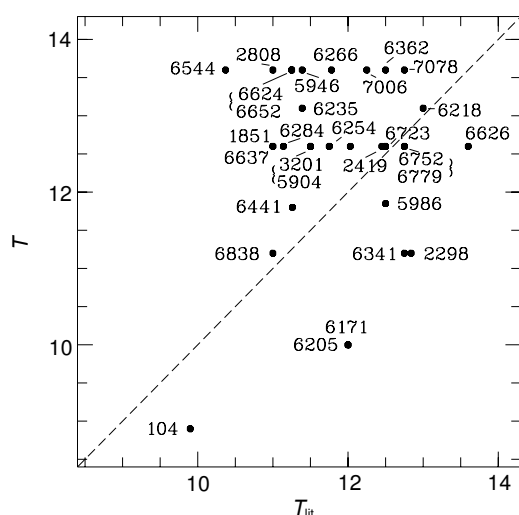


Рис. 5. Сравнение оценок возраста шаровых скоплений Галактики, определенных из анализа интегральных спектров, с литературными данными, полученными по CMD скоплений, для всех объектов, кроме NGC 104 (см. текст).

двух изохрон, показывает, что более подходит изохрона с отсутствием наиболее голубых звезд ГВ: $Z = 0.001$, $Y = 0.26$, $\lg(T) = 10.10$. Можно предположить, что интегральный спектр скопления содержит относительно малое число таких объектов. На рис. 7 показано полное сравнение наблюдаемого и синтетического спектров. Модельный спектр был рассчитан с применением изохроны $Z = 0.001$, $Y = 0.26$, $\lg(T) = 10.10$ и содержаний из таблицы 3. На рисунках видно, что спектры шаровых скоплений NGC 5946, NGC 6235, NGC 6333, NGC 6342, NGC 6544, NGC 6569 из работы Schiavon et al. (2005) имеют низкое отношение S/N по сравнению с модельными спектрами, представленными на ftp-сайте CAO.

На рис. 3 показаны полученные нами оценки содержаний вместе с данными из наших предыдущих работ Khamidullina et al. (2014), Sharina et al. (2014), Sharina and Shimansky (2020), Sharina et al. (2013; 2018; 2017) для галактических (NGC 104, NGC 1904, NGC 2419, NGC 2808, NGC 3201, NGC 5286, NGC 5904, NGC 6121, NGC 6205, NGC 6254, NGC 6341, NGC 6752, NGC 6779, NGC 6838, NGC 7089) и внегалактических (Mayall II, SD 9-GC 7, MGC 1, Vol 298, GC-KKs 3, GC-E269-66, CBF 28, CBF 98) скоплений. Объекты сгруппированы согласно величине $[\text{Fe}/\text{H}]$. Типичные ошибки содержаний показаны на верхней левой панели. На той же панели приведены объекты с $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ dex. На средней панели верхнего ряда рис. 3 представлены объекты с $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -2$ dex, на остальных панелях рисунка даны объекты с $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5 \pm 0.25$ dex.

4.3. Сравнение наших и литературных оценок возраста

Сравнение наших и литературных данных мы проводили по полной выборке 40 скоплений, которая описана в разделе 2. Мы использовали оценки абсолютного возраста скоплений из статьи VandenBerg et al. (2013), а при отсутствии таковых использовали значения из статей Kruijssen et al. (2019) и Testa et al. (2001). Для NGC 104 принято значение возраста 9.9 ± 0.7 млрд. лет, полученное в статье Hansen et al. (2013) с помощью исследования в скоплении последовательности белых карликов. Заметим, что литературные данные об абсолютном возрасте NGC 104 весьма различны (Brogaard et al. 2017). При сравнении наших и литературных оценок все значения, превышающие возраст Вселенной, мы считали равными 13.6 млрд. лет. Мы не нашли в литературе оценок абсолютного возраста для пяти скоплений выборки: NGC 6229, NGC 6333, NGC 6522, NGC 6569, NGC 6638. Сравнение наших оценок абсолютного возраста с литературными (рис. 5) показывает, что различия между ними по модулю больше, чем 1.4 млрд. лет для 14 объектов, то есть для 35% выборки. Кратко остановимся на причинах этих отклонений и в целом на причинах существенных различий в оценках абсолютных возрастов у шаровых скоплений Галактики разными авторами.

Более половины из 14 объектов расположены близко к плоскости Галактики и имеют значительный показатель поглощения света $E(B - V) \geq 0.3$ (Harris 1996, Schlegel et al. 1998). В таких случаях качество спектра определяются не только яркостью самого объекта, но и влиянием большого числа фоновых звезд, которые вносят вклад как в суммарный спектр скопления, так и в суммарный спектр звезд фона, который вычитается из спектра скопления. Таким образом, из-за существенных неоднородностей фона влияние на спектр фоновых звезд может быть как переоценено, так и недооценено. Интенсивность и форма линий водорода и разных химических элементов в спектрах суммарного излучения при этом могут оказаться искаженными случайным образом. Отсюда — неизбежные сложности в интерпретации спектров. Кроме того, Schiavon et al. (2005) отмечали, что спектры скоплений на низких галактических широтах могут быть искажены слабыми эмиссионными линиями галактического фона. Заметим, что описанные сложности в получении и анализе спектров суммарного излучения значимы именно для объектов нашей Галактики, которые имеют большие размеры в проекции на небесную сферу, то есть вероятность искажения их спектров велика.

Далее, для девяти из вышеупомянутых 14 объектов металличность составила $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.4$ dex.

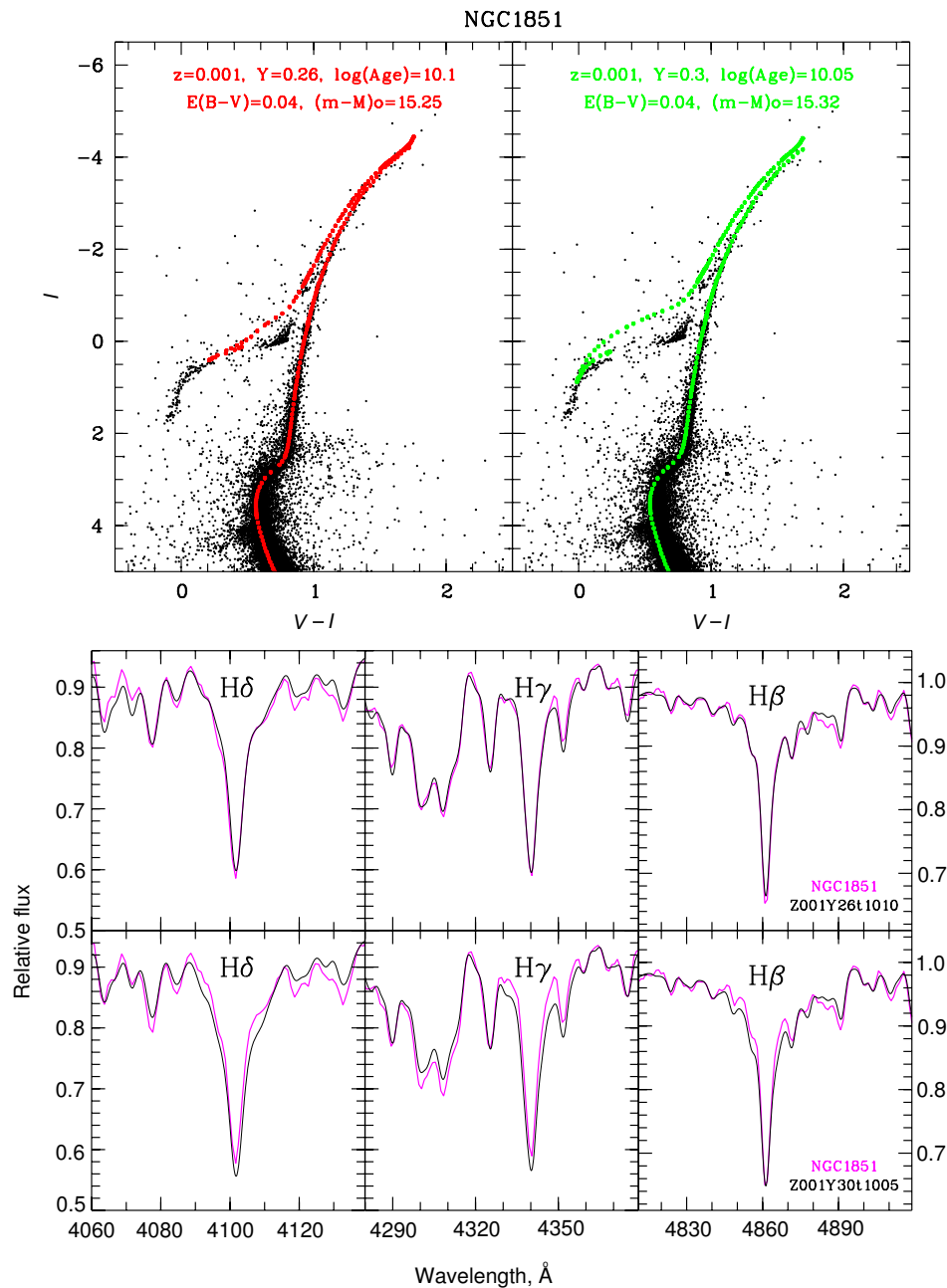


Рис. 6. Верхняя панель: сравнение результатов фотометрии звезд в шаровом скоплении Галактики NGC 1851 (Sarajedini et al. 2007) с теоретическими изохронами звездной эволюции Bertelli et al. (2008). Нижняя панель: сравнение водородных линий в наблюдаемом спектре NGC 1851 (Schiavon et al. 2005) с таковыми в синтетических спектрах интегрального излучения скопления, рассчитанных с изохронами, показанными на верхней панели.

Как известно, проблема разделения совместного влияния эффектов возраста и металличности на наблюдаемые характеристики скоплений решается сложнее при низкой металличности (см., например, VandenBerg et al. (2013), Pietrinferni et al. (2013)) главным образом из-за малости изменений в наблюдаемых параметрах, которые происходят в этом случае при варьировании металличности. Отметим также, что на результаты опреде-

ления возраста скоплений по диаграммам «цвет—звездная величина» оказывает существенное влияние выбранное в моделях звездной эволюции содержание кислорода (Denissenkov et al. 2017, VandenBerg et al. 2013). Ситуация осложняется наличием Na—O-антикорреляций у звезд шаровых скоплений.

Для семи объектов выборки абсолютное расхождение литературных и наших оценок возраста

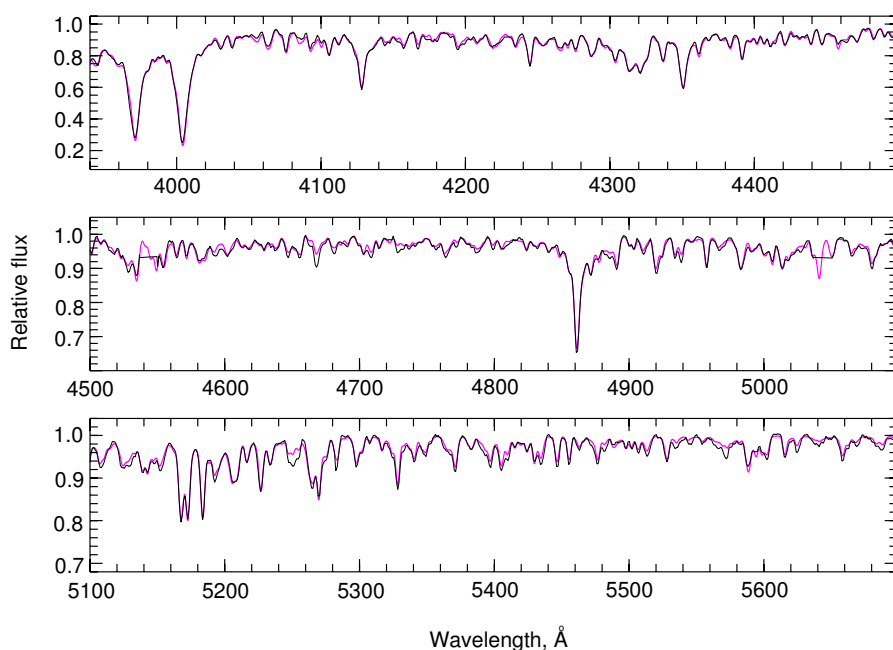


Рис. 7. Сравнение спектра NGC 1851 (Schiavon et al. 2005) с синтетическим спектром скопления (см. текст).

составило более 2 млрд. лет:

NGC 2808: $|\Delta(T)| = 2.6$ Gyr, $E(B-V) = 0.23$ mag,

NGC 5946: $|\Delta(T)| = 2.21$ Gyr, $E(B-V) = 0.54$ mag,

NGC 6171: $|\Delta(T)| = 2.0$ Gyr, $E(B-V) = 0.33$ mag,

NGC 6205: $|\Delta(T)| = 2.0$ Gyr, $E(B-V) = 0.02$ mag,

NGC 6544: $|\Delta(T)| = 3.23$ Gyr, $E(B-V) = 0.73$ mag,

NGC 6624: $|\Delta(T)| = 2.35$ Gyr, $E(B-V) = 0.28$ mag,

NGC 6652: $|\Delta(T)| = 2.35$ Gyr, $E(B-V) = 0.09$ mag.

Как было отмечено в разделе 4.2, объекты NGC 5946 и NGC 6544 имеют низкое отношение S/N в спектрах. Избыток цвета у всех объектов, кроме NGC 2808, NGC 6205 и NGC 6652, составляет $E(B-V) \geq 0.3$ (Harris 1996, Schlegel et al. 1998). Вероятно, спектры этих объектов были искажены фоновыми звездами.

Разберем причины расхождения между нашими и литературными оценками возраста для трех скоплений с низкими значениями $E(B-V) = 0.09$. NGC 2808 — это необычное скопление, у звезд которого наблюдаются значительные вариации в содержании гелия при постоянном содержании азота, таком, как у звезд поля (Cabreza-Ziri et al. (2019) и ссылки в этой статье). На CMD скопления³ по результатам звездной фотометрии Sarajedini et al. (2007) можно заметить значительный разброс звезд по цвету и светимости относительно вписанных эволюционных последовательностей. Анализ

спектра скопления из работы Schiavon et al. (2005) показывает металличность ниже, чем это следует из анализа CMD объекта. Горизонтальную ветвь NGC 2808 не удалось описать изохронами из статьи Bertelli et al. (2008). Она является широкой, экстремально протяженной в голубую сторону, с большим числом слабых по светимости звезд на голубом конце и ярких звезд на красном конце. Для понимания свойств суммарного излучения NGC 2808 нужны более детальные спектральные исследования, определение содержания гелия у отдельных звезд и более совершенные модели звездной эволюции.

NGC 6205 (M 13) — это близкое, яркое и хорошо изученное скопление. На CMD скопления⁴ по результатам звездной фотометрии Sarajedini et al. (2007) видны узкие эволюционные ветви и экстремально протяженная голубая горизонтальная ветвь. Удельное содержание гелия у звезд скопления существенно варьируется (Denissenkov et al. 2017), а у звезд RR Лиры этого объекта авторы отмечают необычно высокие периоды. Спектр суммарного излучения NGC 6205 не удалось однозначно описать с помощью имеющихся моделей звездной эволюции Bertelli et al. (2008). Используемый нами спектр NGC 6205, полученный в Обсерватории Верхнего Прованса с экспозицией 300 с в одном положении щели, не описывает адекватно свойства звездного населения скопления. Более молодой по нашим оценкам возраст

³ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/AnalILMWGCs/NGC1851_2298_2808_3201.pdf

⁴ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/AnalILMWGCs/NGC6638_6652_6723_6205_7006.pdf

свидетельствует о том, что в щель при наблюдениях попало довольно много голубых горячих звезд горизонтальной ветви.

Аналізу спектра NGC 6652 из работы Schiavon et al. (2005) мы посвятили отдельную статью (Sharina et al. 2020). В ней с наблюдаемым спектром сравнивались синтетические спектры, рассчитанные нами с применением не только изохрон Bertelli et al. (2008), но и изохрон группы Teramo (Pietrinferni et al. 2013), а также с применением разных функций масс звезд. В литературе до сих пор не было единого мнения о возрасте NGC 6652 и принадлежности этого объекта к той или иной подсистеме Галактики. Наш анализ спектра скопления из статьи Schiavon et al. (2005) однозначно свидетельствует о том, что объект имеет звездное население с химическим составом и возрастом, типичными для шаровых скоплений балджа Галактики, и о присутствии в скоплении голубых звезд горизонтальной ветви. Именно анализ формы и глубины водородных линий в сочетании с анализом распределения звезд на CMD позволил сделать вывод о более старом возрасте NGC 6652, чем было принято в литературе: 13.6 млрд. лет вместо 11.7 млрд. лет (Chaboyer et al. 2000) или 11.25 млрд. лет (VandenBerg et al. 2013).

4.4. Сравнение содержаний элементов с литературными значениями

Рисунок 4 (левый ряд панелей) демонстрирует различия между определенными нами содержаниями элементов и соответствующими литературными значениями, полученными по результатам спектроскопии высокого разрешения ярчайших звезд скоплений. На рисунке отмечены средние значения отклонений и среднеквадратичные ошибки среднего. Существенных систематических различий нет, за исключением случаев $[Fe/H]$ и $[C/Fe]$. На рис. 4 видно, что определенные нами значения $[Fe/H]$ в среднем на 0.2 dex ниже, чем литературные. Это особенность нашей методики. Вероятной причиной является завышение используемых нами значений ξ_{turb} , которые влияют на интенсивности линий в синтетическом спектре совместно с содержаниями химических элементов. Завышение ξ_{turb} понижает содержания химических элементов, и в первую очередь железа, линии которого преобладают в спектрах. Вопрос требует дополнительного изучения. О причинах систематических отклонений $[C/Fe]$ будет сказано ниже в этом разделе.

Для ряда объектов с $[Fe/H] \sim [-1.8; -1]$ dex имеются большие отклонения $[Fe/H]$ от литературных значений, чем для остальных скоплений. Это NGC 1851, NGC 3201, NGC 6218, NGC 6333, NGC 6362 и NGC 5946. Как было отмечено ранее, объекты NGC 6333 и NGC 5946 имеют низкое

отношение S/N в спектрах. Рассмотрим подробнее случаи NGC 1851, NGC 6218, NGC 6362 и NGC 3201.

Отклонение величины $[Fe/H]$ от литературных данных для NGC 1851 и, вероятно, для многих других скоплений выборки связано с тем, что мы используем изохроны звездной эволюции и модели атмосфер с солнечной картиной содержаний элементов. У звезд NGC 1851, Омега Центавра и ряда других галактических скоплений соотношения между содержаниями химических элементов значительно отличаются от таковых у Солнца. NGC 1851 содержит так называемые «аномальные» звезды второго поколения (см., например Simpson et al. (2017) и ссылки в этой статье). Вариации содержаний элементов C, N, O в их звездах коррелируют с содержаниями элементов s -процесса и с металличностью $[Fe/H]$. Как правило, у таких «аномальных» скоплений существуют две звездные популяции: s -element/Fe-богатые и s -element/Fe-бедные. Четыре звездных популяции имеются у NGC 1851 (Simpson et al. (2017) и ссылки в этой статье). Необходимо более детальное исследование спектра суммарного излучения этого скопления.

Для NGC 6218 большое отклонение значения $[Fe/H]$ от указанного в литературе, видимо, обусловлено двумя основными факторами. 1) Шумы в спектре достаточно велики⁵, особенно в красной его части, линии которой в основном используются при определении металличности. Скопление находится на довольно низкой галактической широте. Вычитание фона может быть неидеальным. 2) Скопление необычное, с экстремально голубой горизонтальной ветвью. Как видно на представленных на ftp-сайте рисунках, подобранные нами для моделирования спектра изохроны Bertelli et al. (2008) не описывают идеально ни спектр, ни CMD скопления. Возможно, причина в том, что картина содержаний элементов у NGC 6218 существенно отличается от солнечной (см., например, Mishenina et al. (2003)).

При наблюдениях NGC 6362 Schiavon et al. (2005) возникли проблемы с ширинами линий в спектре лампы сравнения (раздел 3.5.2 в работе Schiavon et al. (2005)). Поэтому авторы не советовали использовать этот спектр для попиксельного анализа.

NGC 3201 имеет рыхлую структуру и расположено на низкой галактической широте. Schiavon et al. (2005) отмечали в спектре объекта присутствие эмиссии $[O II] \lambda 3727 \text{ \AA}$ и предполагали, что

⁵ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/AnalILMWGCs/NGC5946_5986_6171_6218.pdf

линии бальмеровской серии тоже могут быть искажены слабой HII-эмиссией галактического фона. Водородные линии в спектре NGC 3201 удалось описать модельными спектрами, однако отношение S/N в спектре не очень высокое⁶, и этот факт наверняка повлиял на результаты моделирования.

Продолжим сравнение наших результатов и литературных данных. На рис. 4 (правый ряд панелей) видно, что определенные нами содержания элементов, за исключением $[Fe/H]$, согласуются в пределах ошибок определения с литературными значениями, полученными при изучении интегральных спектров скоплений. О причинах систематических отклонений величины $[Fe/H]$ было сказано выше. Для некоторых объектов наблюдаются существенные различия между нашими и литературными оценками. Так, например, оценки Colucci et al. (2017) содержания $[Mg/Fe]$ у четырех общих с нашей выборкой объектов ниже в среднем примерно на 0.2 dex, чем наши оценки. Оценки Larsen et al. (2017) содержания $[Mg/Fe]$ у NGC 7078, NGC 6254 и NGC 6752 несколько выше наших оценок.

Причины различий могут заключаться не только в особенностях применяемых методик, но и в том, какие звезды попали в интегральные спектры у разных авторов. Спектры были получены с помощью разных телескопов и спектрографов. Не исключено влияние на спектры фоновых звезд. Conroy et al. (2018) использует спектры скоплений из библиотеки Schiavon et al. (2005), то есть те же данные, что анализировали мы. Оценки $[Mg/Fe]$, выполненные Conroy et al. (2018), в среднем совпадают с нашими. Дисперсия различий в оценках составляет 0.16 dex и соответствует средним ошибкам определения этих значений. Напомним, что некоторые спектры объектов из работы Schiavon et al. (2005) получены с относительно низким отношением S/N . Ряд скоплений находится на низких галактических широтах. Поэтому, несмотря на тщательное вычитание фона, их спектры у Schiavon et al. (2005) могут быть значительно искажены фоновыми звездами.

На рис. 4 видно, что значения $[Fe/H]$, определенные нами, примерно на 0.2 dex ниже, чем литературные. Это особенность нашего метода. Возможной причиной может быть переоценка использованных нами величин ξ_{turb} , что влияет на интенсивности линий в синтетических спектрах и на содержания химических элементов. Переоценка ξ_{turb} приводит к уменьшению величин содержания химических элементов, и в первую очередь железа,

линии которого превалируют в спектрах. Вопрос требует дополнительного изучения.

Отметим факт различия оценок $[C/Fe]$, полученных по интегральным спектрам скоплений и спектрам их ярчайших звезд (рис. 4, две нижних панели). В то время как среднее различие между нашими оценками и данными Conroy et al. (2018) равно -0.066 dex, различие между нашими $[C/Fe]$ скоплений и средними $[C/Fe]$ ярчайших звезд скоплений составляет в среднем $+0.38$ dex. Мы интерпретируем последнее как эффект изменения химического состава атмосфер звезд в процессе их эволюции (см. Kraft (1994)).

4.5. Содержания элементов в шаровых скоплениях в зависимости от металличности и их сравнение с моделями химической эволюции

Распределения содержания химических элементов для 40 шаровых скоплений Галактики показаны на рис. 8. Средние значения содержания и стандартные отклонения для 40 объектов следующие:

$$[C/Fe] = -0.025 \pm 0.17 \text{ dex}, [Mg/Fe] = 0.32 \pm 0.22 \text{ dex},$$

$$[Ca/Fe] = 0.22 \pm 0.12 \text{ dex}, [Ti/Fe] = 0.14 \pm 0.24 \text{ dex},$$

$$[Cr/Fe] = 0.05 \pm 0.16 \text{ dex}, [Mn/Fe] = -0.17 \pm 0.22 \text{ dex},$$

$[Na/Fe] = 0.3 \pm 0.2$ dex. На рис. 3 видно, что в целом в трех группах скоплений с разной металличностью распределения содержания похожи.

Большинство скоплений нашей выборки имеют $[Fe/H] \leq -1.0$ dex и, по-видимому, принадлежат гало Галактики, разделенному на внутреннюю и внешнюю подсистемы, согласно Carretta et al. (2010). Проблемы определения принадлежности скоплений той или иной подсистеме рассматриваются, например, в работе Marsakov et al. (2019). Часть исследованных в данной работе скоплений принадлежит балджу Галактики (Bica et al. 2016): NGC 6342 ($[Fe/H]_{our} = -0.9$, $[Mg/Fe]_{our} = 0.5$), NGC 6522 (-1.45 , 0.6), NGC 6624 (-1.0 , 0.6), NGC 6626 (-1.5 , 0.3), NGC 6637 (-1.0 , 0.5), NGC 6723 (-1.4 , 0.4). Некоторые объекты нашей выборки, по-видимому, попали в область балджа из внешних частей Галактики (Bica et al. 2016): NGC 6333 ($[Fe/H]_{our} = -2.3$, $[Mg/Fe]_{our} = 0.3$), NGC 6171 (-1.25 , 0.5), NGC 6235 (-1.5 , -0.05), NGC 6441 (-0.9 , $[0.4; 0.6]$), NGC 6544 (-1.8 , 0.2), NGC 6569 (-1.2 , 0.6). Некоторые богатые металлами скопления выборки наблюдаются за пределами балджа, то есть на расстояниях от центра Галактики больше 4.5 кпк: NGC 104 ($[Fe/H] = -1.0$, $[Mg/Fe] = 0.6$, (Sharina et al. 2018)), NGC 6362 ($[Fe/H]_{our} = -1.45$, $[Mg/Fe] = 0.4$). Bica et al.

⁶ ftp://ftp.sao.ru/pub/sme/AnalILMWGCs/NGC1851_2298_2808_3201.pdf

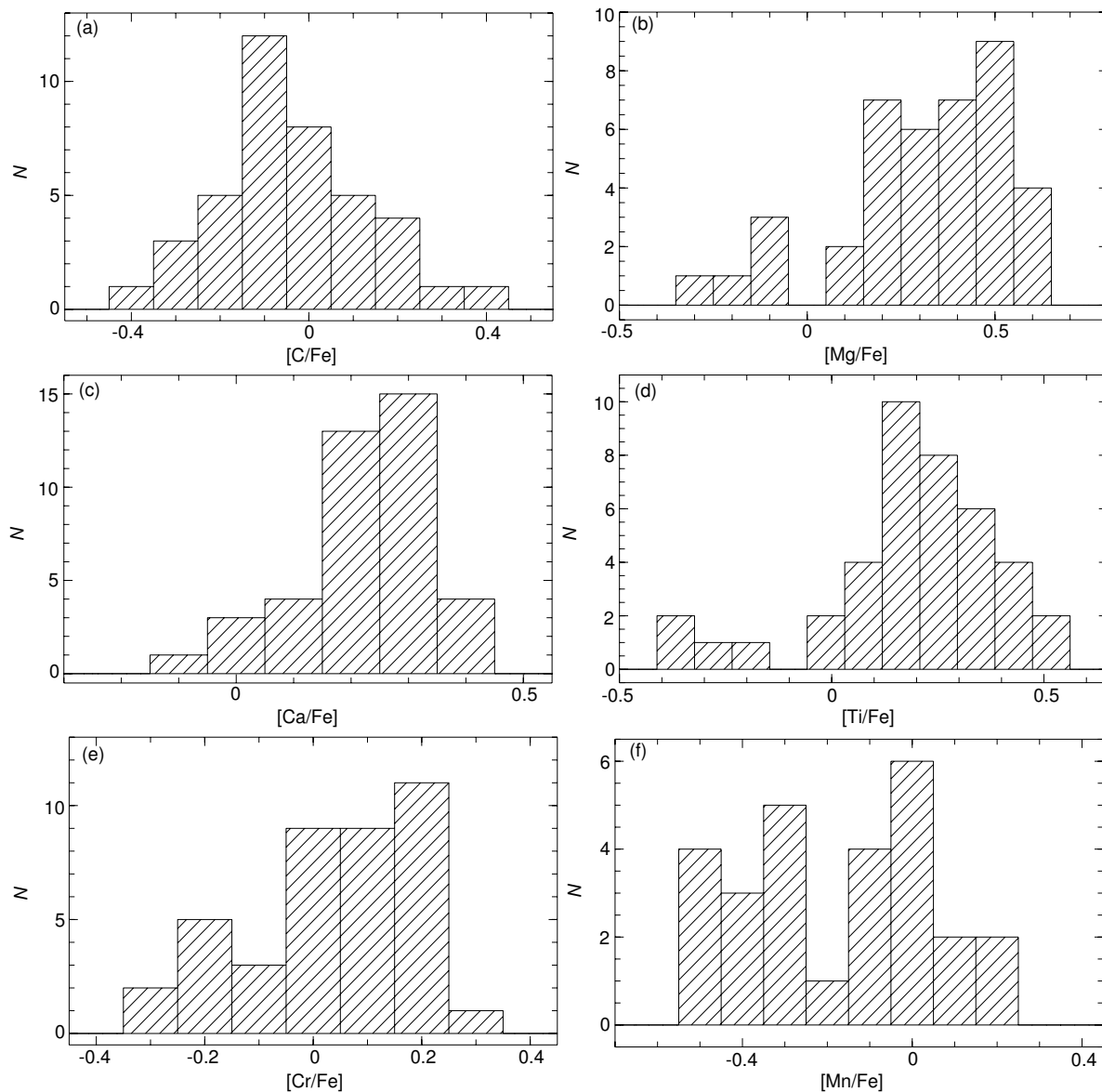


Рис. 8. Распределения полученных содержаний химических элементов для 40 шаровых скоплений Галактики (см. текст).

(2016) сделали вывод о том, что распределения содержаний элементов α -процесса (O, Mg, Si, и Ca) в зависимости от $[\text{Fe}/\text{H}]$ у скоплений балджа и звезд поля похожи.

Содержания химических элементов дают важную информацию о том, какие сверхновые (SNe) и другие звезды внесли вклад в формирование химического состава исследуемых объектов и подсистем галактик, к которым они относятся. Сравним оцененные нами содержания элементов с модельными в теории химической эволюции Kobayashi et al. (2006). Эти авторы исследовали производство элементов сверхновыми типа II (SNe II) и гиперновыми. Kobayashi et al. (2006) моделировали химическую эволюцию гало, балджа и толстого диска Галактики. Эти три модели значительно отличаются (в

сравнении с нашими ошибками определения содержаний элементов) для O, Mg, Ca, Ti, Cr и Mn только в диапазоне по металличности $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$ и $[\text{Fe}/\text{H}] \geq 1.0$ (рис. 32 в работе Kobayashi et al. (2006)).

Рассмотрим распределения содержаний элементов в зависимости от $[\text{Fe}/\text{H}]$, представленные Kobayashi et al. (2006) для диапазона металличности $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$ dex, в пределах которого главным образом находятся объекты нашей выборки. Элементы O и Mg образовались в основном в процессах гидростатического горения в SNe II, и значения их содержаний зависят от модели сверхновой. В работе Kobayashi et al. (2006) $[\text{O}/\text{Fe}] \approx 0.42$ при $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0$ dex и примерно

постоянно в диапазоне $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$. Напомним, что мы задавали значения $[\text{O}/\text{Fe}] \sim [0.3; 0.5]$ для исследуемых объектов, что находится в согласии с результатами Kobayashi et al. (2006).

Модельные содержания других элементов α -процесса также примерно постоянны в этом диапазоне металличности: $[\text{Mg}/\text{Fe}] \sim 0.49$ dex, $[\text{Ca}/\text{Fe}] \sim 0.27-0.39$ dex (Kobayashi et al. 2006). Наблюдаемые пониженные содержания $[\text{El}/\text{Fe}]$ элементов α -процесса можно объяснить вспышками SNe Ia, которые производят в основном железо, а также вспышками SNe II малых масс $13-15 M_{\odot}$ (Kobayashi et al. 2006). Наши результаты для Mg и Ca для большинства объектов согласуются с модельными расчетами (рис. 8). Мы определили отрицательные $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ для NGC 2419, NGC 6235, NGC 6341, NGC 6779 и NGC 7078. Все эти скопления, кроме NGC 6235, имеют низкую металличность $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2$ dex. NGC 2419 — это самое далекое массивное шаровое скопление Галактики с большими аномалиями химического состава (см., например, Sharina et al. (2013) и ссылки в этой статье). Отрицательное значение $[\text{Ca}/\text{Fe}]$ было получено только для NGC 6544.

Модельное содержание $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ в среднем составляет -0.1 dex (Kobayashi et al. 2006). Авторы отмечают, что наблюдаемые значения систематически выше модельных примерно на 0.4 dex. Полученные нами значения $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ в основном больше нуля. Отрицательные значения получены для NGC 6171, NGC 6218, NGC 6235, NGC 6266, NGC 6342, NGC 6652. Часть из этих объектов находится в области балджа: NGC 6171, NGC 6235, NGC 6342.

Основными источниками углерода и азота являются звезды асимптотической ветви, Вольфа-Райе и маломассивные звезды с массой меньше массы Солнца. Вклад этих источников не включен в расчеты Kobayashi et al. (2006). Модельные содержания углерода варьируются примерно в пределах $[-0.2; -0.25]$ dex в диапазоне $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$ dex. Полученные нами содержания так же, как и наблюдательные данные для звезд фона из литературы (Kobayashi et al. 2006), варьируются в широких пределах (рис. 8).

Содержания нечетных Z -элементов (Na, Al, Si) сильно зависят от металличности (Kobayashi et al. 2006). Отметим, что для Na необходим учет значимых не-ЛТР эффектов в атмосферах звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.0$ dex. Модельные содержания Na увеличиваются примерно от -0.3 до 0.1 dex в диапазоне $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$ (Kobayashi et al. 2006). Содержания Na нами были определены уверенно далеко не у всех объектов выборки, так как единственной возможностью выполнить эту задачу

было использование слабых линий Na I 5682 Å, 5688 Å. К тому же спектры из работы Schiavon et al. (2005) имеют относительно низкое отношение S/N в красной спектральной области. Наши оценки находятся в пределах $-0.2 \leq [\text{Na}/\text{Fe}] \leq 0.7$ (таблица 3).

Модельные содержания элементов группы железа Cr и Mn примерно постоянны в диапазоне металличности $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$; $[\text{Cr}/\text{Fe}] \sim 0.1-0.5 \leq [\text{Mn}/\text{Fe}] \leq -0.6$. Линии Mn и Cr довольно слабы в используемых нами спектрах. На рис. 8 видно, что наши оценки содержаний Mn и Cr варьируются в довольно широких пределах: скопления с отрицательными $[\text{Cr}/\text{Fe}]$ это NGC 6205, NGC 6218, NGC 6342, NGC 6652, NGC 6723, NGC 6779, NGC 7006, NGC 7078, а объекты со значениями $[\text{Mn}/\text{Fe}] \geq 0$ таковы: NGC 2298, NGC 2419, NGC 5986, NGC 6522.

Matteucci et al. (2019) представили модели химической эволюции балджа и внутреннего диска Галактики. Они рассматривали картину зависимости $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$. Модели Matteucci et al. отличаются темпом и эффективностью звездообразования, начальной функцией масс (Calamida et al. 2015, Kroupa et al. 1993, Salpeter 1955) и источником выходов химической эволюции SNe Ia (yields). Как видно на рисунках, представленных Matteucci et al. (2019), примерный ход теоретического распределения $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$ для разных моделей, за исключением модели для диска, таков: $[\text{Mg}/\text{Fe}] \sim 0.43$ при $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$, затем рост до $[\text{Mg}/\text{Fe}] \sim 0.5$ при $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$ и далее спад до прежнего значения $[\text{Mg}/\text{Fe}] \sim 0.43$ при $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.7$. Полученные нами содержания Mg для скоплений выборки в балдже и для NGC 104 и NGC 6362 в целом согласуются с данной моделью в пределах наших ошибок определения содержаний (рис. 3, 4).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Длиннощелевые интегральные спектры среднего разрешения 26 галактических шаровых скоплений использованы для определения возраста, массовой фракции гелия Y , металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ и оценки содержаний элементов C, O, Na, Mg, Ca, Ti, Cr и Mn. Применена наша оригинальная методика, описанная в разделе 2, которая была дополнена в данной работе автоматическим учетом скорости микротурбуленции при расчете спектров звезд скоплений. Методика может использоваться интегральные спектры скоплений умеренного разрешения ($\lambda/\delta\lambda \geq 1000$) в широком спектральном диапазоне ($\lambda \sim [3900; 5000]$ Å), и поэтому может

быть применена к исследованию не только галактических, но и ярких внегалактических объектов. Выбор оптимальной изохроны для расчета синтетического спектра скопления производится путем согласования формы и интенсивности наблюдаемых и теоретических профилей линий бальмеровской серии водорода, а также воспроизведения наблюдаемого соотношения линий Ca I и Ca II.

В статье продемонстрировано согласие наших оценок для шаровых скоплений Галактики с соответствующими литературными значениями, полученными по результатам звездной фотометрии и спектроскопии ярчайших звезд объектов со спектрографами высокого разрешения, а также из исследования интегральных спектров скоплений. Причины значительных отклонений полученных возрастов и металличностей скоплений от соответствующих литературных значений обсуждаются в разделе 4. Систематическое отличие в наших оценках $[C/Fe]$ от литературных данных, полученных спектроскопией ярчайших звезд объектов, интерпретировано нами как эффект изменения химического состава атмосфер звезд в процессе их эволюции.

Показано, что результаты определения нами содержаний химических элементов не противоречат при данной металличности соответствующим значениям в моделях химической эволюции Kobayashi et al. (2006) и Matteucci et al. (2019).

В дальнейшем мы, в частности, планируем исследовать влияние не-ЛТР эффектов на содержания элементов, полученные по интегральным спектрам, а также изучить влияние функции масс звезд на интегральные спектры скоплений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим рецензента за замечания, которые позволили улучшить статью. Мы благодарим А. И. Колбина за помощь в оформлении рисунков раздела 3.1 статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке РФФИ грантом 18-02-00167. Ш.Н.Н. выражает признательность РФФИ за поддержку грантом 18-42-160003. Работа Ш. В. В. выполнена за счет средств субсидии, выделенной КФУ (проект 0671-2020-0052 госзадания 075-00216-20-05). Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение №05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в отношении этой статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Bertelli, L. Girardi, P. Marigo, and E. Nasi, *Astron. and Astrophys.* **484** (3), 815 (2008).
2. E. Bica, S. Ortolani, and B. Barbuy, *Publ. Astron. Soc. Australia* **33**, e028 (2016).
3. C. Boeche and E. K. Grebel, *Astron. and Astrophys.* **587**, A2 (2016).
4. C. Boeche, A. Siebert, M. Williams, et al., *Astron. J.* **142** (6), 193 (2011).
5. K. Brogaard, D. A. Vandenberg, L. R. Bedin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468** (1), 645 (2017).
6. H. Bruntt, S. Basu, B. Smalley, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423** (1), 122 (2012).
7. I. Cabrera-Ziri, C. Lardo, and A. Mucciarelli, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (3), 4128 (2019).
8. A. Calamida, K. C. Sahu, S. Casertano, et al., *Astrophys. J.* **810** (1), 8 (2015).
9. B. W. Carney, *Star Clusters, Saas-Fee Advanced Courses, Vol. 28: Stellar Evolution in Globular Clusters* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001) p. 1.
10. E. Carretta, A. Bragaglia, R. G. Gratton, et al., *Astron. and Astrophys.* **516**, A55 (2010).
11. F. Castelli and R. L. Kurucz, *IAU Symp.* **210**, A20 (2003).
12. B. Chaboyer, A. Sarajedini, and T. E. Armandroff, *Astron. J.* **120** (6), 3102 (2000).
13. G. Chabrier, *Astrophys. Space Sci. Library* **327**, 41 (2005).
14. C. Charbonnel, *EAS Publ. Ser.* **80–81**, pp. 177–226 (2016).
15. J. E. Colucci, R. A. Bernstein, and A. McWilliam, *Astrophys. J.* **834** (2), 105 (2017).
16. C. Conroy, A. Villaume, P. G. van Dokkum, and K. Lind, *Astrophys. J.* **854** (2), 139 (2018).
17. P. A. Denissenkov, D. A. Vandenberg, G. Kopacki, and J. W. Ferguson, *Astrophys. J.* **849** (2), 159 (2017).
18. A. Dotter, A. Sarajedini, J. Anderson, et al., *Astrophys. J.* **708** (1), 698 (2010).
19. D. A. Forbes and T. Bridges, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **404** (3), 1203 (2010).
20. G. A. Galazutdinov, V. V. Shimansky, A. Bondar, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465** (4), 3956 (2017).
21. R. G. Gratton, E. Carretta, and A. Bragaglia, *Astron. and Astrophys.* **20**, 50 (2012).
22. B. M. S. Hansen, J. S. Kalirai, J. Anderson, et al., *Nature* **500** (7460), 51 (2013).
23. W. E. Harris, *Astron. J.* **112**, 1487 (1996).
24. C. I. Johnson, N. Caldwell, R. M. Rich, et al., *Astrophys. J.* **842** (1), 24 (2017).

25. F. Kahraman Aliçavuş, E. Niemczura, P. De Cat, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **458** (3), 2307 (2016).
26. D. A. Khamidullina, M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and E. Davoust, *Astrophysical Bulletin* **69** (4), 409 (2014).
27. C. Kobayashi, H. Umeda, K. Nomoto, et al., *Astrophys. J.* **653** (2), 1145 (2006).
28. R. P. Kraft, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 553 (1994).
29. P. Kroupa, C. A. Tout, and G. Gilmore, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **262**, 545 (1993).
30. J. M. D. Kruijssen, J. L. Pfeffer, M. Reina-Campos, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (3), 3180 (2019).
31. S. S. Larsen, J. P. Brodie, and J. Strader, *Astron. and Astrophys.* **546**, A53 (2012).
32. S. S. Larsen, J. P. Brodie, and J. Strader, *Astron. and Astrophys.* **601**, A96 (2017).
33. L. Malavolta, C. Sneden, G. Piotto, et al., *Astron. J.* **147** (2), 25 (2014).
34. A. F. Marino, S. Villanova, G. Piotto, et al., *Astron. and Astrophys.* **490** (2), 625 (2008).
35. V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 403 (2019).
36. D. Massari, A. Mucciarelli, E. Dalessandro, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468** (1), 1249 (2017).
37. F. Matteucci, V. Grisoni, E. Spitoni, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (4), 5363 (2019).
38. A. McWilliam and R. A. Bernstein, *Astrophys. J.* **684** (1), 326 (2008).
39. V. S. Menzhevitski, N. N. Shimanskaya, V. V. Shimansky, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **69** (2), 169 (2014).
40. S. Mészáros, S. L. Martell, M. Shetrone, et al., *Astron. J.* **149** (5), 153 (2015).
41. T. V. Mishenina, V. E. Panchuk, and N. N. Samus', *Astronomy Reports* **47** (3), 248 (2003).
42. P. E. Nissen, *Astron. and Astrophys.* **97**, 145 (1981).
43. A. Pietrinferni, S. Cassisi, M. Salaris, and S. Hidalgo, *Astron. and Astrophys.* **558**, A46 (2013).
44. G. Piotto, I. R. King, S. G. Djorgovski, et al., *Astron. and Astrophys.* **391**, 945 (2002).
45. B. J. Pritzl, K. A. Venn, and M. Irwin, *Astron. J.* **130** (5), 2140 (2005).
46. J. C. Roediger, S. Courteau, G. Graves, and R. P. Schiavon, *Astrophys. J. Suppl.* **210** (1), 10 (2014).
47. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **121**, 161 (1955).
48. N. C. Santos, S. G. Sousa, A. Mortier, et al., *Astron. and Astrophys.* **556**, A150 (2013).
49. A. Sarajedini, L. R. Bedin, B. Chaboyer, et al., *Astron. J.* **133** (4), 1658 (2007).
50. M. Schaeuble, G. Preston, C. Sneden, et al., *Astron. J.* **149** (6), 204 (2015).
51. R. P. Schiavon, J. A. Rose, S. Courteau, and L. A. MacArthur, *Astrophys. J. Suppl.* **160** (1), 163 (2005).
52. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500** (2), 525 (1998).
53. M. E. Sharina, C. J. Donzelli, E. Davoust, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A48 (2014).
54. M. E. Sharina and V. V. Shimansky, *IAU Symp.* **351**, pp. 165–169 (2020).
55. M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and E. Davoust, *Astronomy Reports* **57** (6), 410 (2013).
56. M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and D. A. Khamidullina, *Astrophysical Bulletin* **73** (3), 318 (2018).
57. M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and A. Y. Kniazev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471** (2), 1955 (2017).
58. M. E. Sharina and V. V. Shimansky, arXiv:2004.05957 (2020).
59. J. D. Simpson, S. L. Martell, and C. A. Navin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465** (1), 1123 (2017).
60. V. Testa, C. E. Corsi, G. Andreuzzi, et al., *Astron. J.* **121** (2), 916 (2001).
61. D. A. Vandenberg, K. Brogaard, R. Leaman, and L. Casagrande, *Astrophys. J.* **775** (2), 134 (2013).
62. D. Yong, A. Alves Brito, G. S. Da Costa, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439** (3), 2638 (2014).

Analysis of Integrated-Light Spectra of Galactic Globular Clusters

M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and N. N. Shimanskaya

We present the results of determination of the age, helium mass fraction (Y), metallicity ($[Fe/H]$), and abundances of the elements C, O, Na, Mg, Ca, Ti, Cr and Mn for 26 globular clusters of the Galaxy. In this work, we have applied the original method developed by us which makes use medium-resolution integrated-light spectra of globular clusters and models of stellar atmospheres and supplemented in this paper by automatic calculation of microturbulence velocities of stars in the studied objects. Based on the data obtained for 26 objects, as well as the results of our previous studies, it is shown that the abundances of chemical elements, we measured, with the exception of carbon, are consistent with the literature estimates from the analysis of integrated-light spectra of clusters and from high-resolution spectroscopic observations of their brightest stars. Our estimates of $[C/Fe]$ are consistent with the literature values obtained from the integrated-light spectra of clusters. We interpret the systematic difference between the derived $[C/Fe]$ for globular clusters and the literature $[C/Fe]$ values for the brightest stars of the clusters as the change of the chemical composition in the atmospheres of stars during their evolution. Estimated absolute ages and average Y for the clusters are in a reasonable agreement with the literature data from the analysis of color–magnitude diagrams of the objects.

Keywords: *globular clusters: general—globular clusters: chemical composition—galaxies*