

УДК 524.74:524.47–36

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ NGC 6229 И NGC 6779

© 2014 Д. А. Хамидуллина¹, М. Е. Шарина^{2*}, В. В. Шиманский¹, Е. Davoust³¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия³Научно-исследовательский институт астрофизики и планетологии, Университет Тулузы, Национальный центр научных исследований, Тулуза, 31400 Франция

Поступила в редакцию 7 мая 2014 года; принята в печать 11 августа 2014 года

Длиннощелевые спектры среднего разрешения Галактических шаровых скоплений NGC 6229 и NGC 6779, полученные с помощью спектрографа CARELEC на 1.93-м телескопе обсерватории Верхнего Прованса, были использованы для определения возраста, индекса содержания гелия Y и металличности $[Fe/H]$, а также первой оценки содержания элементов C, N, O, Mg, Ca, Ti, Cr для этих объектов. Задача решалась сравнением наблюдаемых спектров с интегральными синтетическими спектрами скоплений, рассчитанными методом моделей звездных атмосфер для заданных параметров входящих в них звезд. Модельные значения масс, T_{eff} и $\lg g$ определялись путем сравнения наблюдаемых диаграмм «цвет–звездная величина» с теоретическими изохронами. Суммирование синтетических бланкетированных спектров звезд производилось с учетом функции масс Chabrier. Для проверки точности наших результатов мы определили этим же методом химсостав, $[Fe/H]$, $\lg t$ и Y для скоплений NGC 5904 и NGC 6254, которые по литературным данным являются близкими аналогами объектов нашего исследования. Используя спектры среднего разрешения из библиотеки Schiavon et al., мы получили для этих двух скоплений удовлетворительное согласие с литературными оценками для всех искомым величин в пределах ошибок их определения. Получены следующие параметры скоплений. NGC 6229: $[Fe/H] = -1.65$ dex, $t = 12.6$ млрд лет, $Y = 0.26$, $[\alpha/Fe] = 0.28$ dex; NGC 6779: $[Fe/H] = -1.9$ dex, $t = 12.6$ млрд лет, $Y = 0.23$, $[\alpha/Fe] = 0.08$ dex; NGC 5904: $[Fe/H] = -1.6$ dex, $t = 12.6$ млрд лет, $Y = 0.30$, $[\alpha/Fe] = 0.35$ dex; NGC 6254: $[Fe/H] = -1.52$ dex, $t = 11.2$ млрд лет, $Y = 0.30$, $[\alpha/Fe] = 0.025$ dex. Под значением $[\alpha/Fe]$ подразумевается среднее между содержаниями Ca и Mg.

Ключевые слова: Галактика: химический состав — шаровые скопления: индивидуальные: NGC 6229, NGC 6779

1. ВВЕДЕНИЕ

В нашей Галактике примерно 150 шаровых скоплений (ШС) с разными светимостями, размерами, плотностью звезд в центре [1]. Большинство ШС старые ($t = 7\text{--}15$ млрд лет). Скопления движутся с разными скоростями на разном расстоянии относительно центра Галактики и отличаются друг от друга химическим составом. Объекты с относительно высоким содержанием металлов встречаются ближе к центру Галактики. Их называют скоплениями балджа. Наиболее низкометаллические ($-2.4 < [Fe/H] < -1.5$ dex) ШС встречаются в гало нашей Галактики. Самым далеким из таких объектов является NGC 2419, галактоцентрическое расстояние которого равно $R_{GC} = 84$ кпк, что

в 3.5 раза превышает расстояние $R_{GC} = 24$ кпк до ближайшей к Млечному Пути сфероидальной карликовой галактики Sagittarius dSph. Характерные параметры подсистем ШС и свойства объектов, населяющих их, описаны, например, в статье Борковой и Марсакова [2].

Для большинства ШС Галактики металличность известна из сравнения результатов звездной фотометрии с теоретическими эволюционными треками и изохронами. Ярчайшие звезды скоплений исследуются с помощью спектрографов высокого разрешения. Далеко не все ШС Галактики изучены спектрально. Скопления нашего исследования NGC 6229 и NGC 6779 (M 59) относятся к числу таких мало изученных объектов.

Основные характеристики объектов нашего исследования приведены в таблице 1 наряду со свой-

*E-mail: sme@sao.ru

Таблица 1. Основные параметры исследуемых и выбранных для сравнения шаровых скоплений по данным каталога [1]: гелиоцентрическое расстояние Dist_{\odot} ; Галактоцентрическое расстояние Dist_{GC} , предполагая $\text{Dist}_{\text{GC}} = 8$ кпк для Солнца; абсолютная звездная величина в фильтре V системы Johnson–Cousins; центральная поверхностная яркость в фильтре V ; колор-эксцесс; приливной радиус r_t ; радиус ядра r_c ; центральная концентрация $c = \lg(r_t/r_c)$; логарифм центральной плотности светимости

Параметр	NGC 6229	NGC 6779	NGC 5904	NGC 6254
Dist_{\odot} , кпк	30.4	10.1	7.5	4.4
Dist_{GC} , кпк	29.7	6.2	9.7	4.6
M_V , mag	-8.05	-7.38	-8.81	-7.48
μ_V , mag arcsec ⁻²	16.99	18.06	16.05	17.69
$E(B - V)$, mag	0.01	0.20	0.03	0.28
r_t , пк	47.6	25.15	61.96	27.49
r_c , пк	1.15	1.08	0.91	1.10
c	1.61	1.37	1.83	1.40
$\lg L_{\text{cent}}, L_{\odot}/\text{пк}^3$	3.41	3.26	3.91	3.5

ствами подобранных нами из литературы [1] их близких аналогов по металличности, возрасту, типу горизонтальной ветви и другим параметрам: NGC 5904 (M_5) и NGC 6254 (M_{10}). Спектры этих двух ШС мы взяли из библиотеки Schiavon et al. [3]. Все четыре ШС нашего исследования являются массивными, динамически проэволюционировавшими объектами с высокой плотностью звезд в центре.

NGC 6229 — одно из самых далеких ШС внешнего гало. Звездная фотометрия и построение диаграммы «цвет–звездная величина» ($C-M$) скопления выполнены несколькими авторами в период 1986–1991 гг. (см. ссылки в статье [4]). Первая глубокая фотометрия ядра и периферии скопления, включающая полностью горизонтальную ветвь (ГВ) и асимптотическую ветвь гигантов, проведена в работах Бориссовой с соавторами на 2-м телескопе Болгарской НАО [4–6]. В этих статьях, а также в работе [7] детально исследованы структура ГВ и переменные звезды в NGC 6229, а также определено положение точки поворота главной последовательности (ГП). Бориссовой и др. [5] впервые отмечено сходство металличности и возраста NGC 6229 и NGC 5904. Общим свойством двух скоплений является наличие в них значительного числа переменных звезд типа RR Лиры. Голубые звезды ярче точки поворота ГП (голубые бродяги) были изучены в [8] на материале снимков телескопа «Хаббл».

NGC 6779 — бедное металлами шаровое скопление гало, сравнительно мало исследованное из-за близости к плоскости Млечного Пути.

Hatzidimitriou et al. [9] представили глубокую наземную фотометрию этого скопления, а Sarajedini et al. [10] и Dotter et al. [11] выполнили звездную фотометрию на материале хаббловских снимков. Авторами были оценены металличность и возраст скопления с применением изохрон Дартмусской группы [12]. В отличие от NGC 6229, NGC 6779 имеет низкую металличность (см. таблицу 1) и голубую протяженную ГВ.

NGC 5904 является самым близким к нам ШС, далеким от плоскости Галактики. Поэтому это отличный объект для изучения химсостава отдельных звезд в ШС и построения глубоких диаграмм $C-M$. Его аккуратная фотометрия служит для проверки моделей звездной эволюции. Скопление содержит большое число переменных звезд. Оно имеет огромную пространственную скорость и очень эксцентричную орбиту [13]. В нем найдены два миллисекундных пульсара, один из которых ассоциируется с массивной нейтронной звездой [14]. Природа этих объектов до конца не ясна. Sorrola et al. [15] определили расстояние до скопления по соотношению «период–инфракрасная величина» звезд типа RR Lyg: $(M - m)_0 = 14^m 44 \pm 0^m 02$. Близкие оценки расстояния были получены приближением эволюционных последовательностей скопления теоретическими треками с использованием хаббловской звездной фотометрии [16, 17].

NGC 6254 является одним из близких скоплений гало Галактики, для которого доступна глубокая хаббловская фотометрия. Ее результаты позволили, в частности, определить процент двойных звезд в зависимости от расстояния до цен-

Таблица 2. Журнал спектральных наблюдений

Объект	Дата	Экспозиция, с	Положение щели, град.
NGC 6229	09.07.10	600	0
		600	90
NGC 6779	09.07.10	300	95
		300	99
	11.07.10	2 × 900	0

тра NGC 6254 [18]. Эти результаты в свою очередь дали возможность объяснить низкий уровень сегрегации массы в скоплении без привлечения гипотезы о черной дыре промежуточной массы в центре скопления [19]. Глубокая фотометрия на хаббловских снимках и определение расстояния и галактического поглощения для NGC 6254 были представлены также в [10].

Интегральные спектры двух близких скоплений NGC 5904 и NGC 6254 вошли в спектральную библиотеку Schiavon et al. [3], на материале которой впоследствии было проведено множество исследований разными авторами. Глубокие диаграммы $C-M$ скоплений NGC 6779, NGC 5904 и NGC 6254 [10, 16] широко использовались для выяснения эволюционного статуса скоплений и тестирования моделей звездных населений. VandenBerg et al. [20] определили возраст, $[Fe/H]$ и индекс содержания гелия для NGC 6779, NGC 5904 и NGC 6254, применяя разработанные ими модели Victoria-Regina.

В настоящее время с развитием наблюдательной и вычислительной техники для анализа излучения отдельных звезд в ШС и определения их параметров часто применяется метод синтетических спектров, рассчитываемых с использованием моделей звездных атмосфер. Путем варьирования содержания различных химических элементов минимизируется отклонение теоретических спектров от наблюдаемых. Используемый спектральный диапазон должен быть настолько большим, чтобы включать в себя как достаточное число линий одного и того же элемента в разных стадиях ионизации, так и множество линий разных элементов. Очевидно, что для получения наиболее полной и точной информации желательно использовать спектры с максимально высоким разрешением. Однако их получение с достаточно высоким отношением S/N требует большого наблюдательного времени крупных телескопов и возможно только для наиболее ярких звезд. Анализ интегрального

излучения скоплений позволяет эффективно анализировать данные, полученные на 1–2-м телескопах для всех объектов Галактики и на крупных телескопах для внегалактических скоплений. Реализация этого подхода для четырех скоплений, описанных выше, выполнена в данной работе. Она позволила получить ценный материал для сравнения фотометрических и спектральных моделей звездной эволюции, что является необходимой основой для понимания свойств звездных населений других галактик.

В разделе 2 описаны наблюдения и методика их обработки. В разделе 3 представлен метод моделирования интегральных спектров скоплений в соответствии с данными изохрон и функцией светимости и определения содержания химических элементов. В разделе 4 обсуждаются результаты исследования, а выводы формулируются в разделе 5.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Мы выполнили наблюдения скоплений NGC 6229 и NGC 6779 на 1.93-м телескопе обсерватории Верхнего Прованса для сравнительного анализа свойств их звездных населений со свойствами, известными по изучению глубоких диаграмм $C-M$. Журнал наблюдений представлен в таблице 2. Длиннощелевые спектры ($5'5 \times 2''$) среднего разрешения были получены со спектрографом CARELEC [15]. Использовалась решетка 300 штр./мм, которая обеспечивала дисперсию порядка 1.78 \AA на пиксель и спектральное разрешение (полуширина инструментального профиля — Full Width at Half Maximum) $FWHM \sim 5 \text{ \AA}$ в рабочем спектральном диапазоне $3700-6800 \text{ \AA}$. Калибровочные экспозиции HeNe-ламп выполнялись в начале и в конце каждой ночи. Наблюдения проводились в сложных астроклиматических условиях с наличием переменной и циррусной облачности, средний размер звездных изображений был $2'5-3'5$. Однако полное отсутствие лунной засветки позволяло получать ПЗС-снимки необходимого качества в моменты локальных прояснений. Как видно из таблицы 2, наблюдения проводились с несколькими фиксированными положениями щели. Во всех случаях щель была ориентирована так, чтобы в нее попадали не только центральная, наиболее яркая часть ШС, но и окружающие максимально населенные звездами районы. Таким образом, результирующее двумерное спектральное изображение позволяло сравнивать распределения энергии и отдельные спектральные линии центральной, неразрешенной на отдельные объекты области и окружающих звезд. В результате мы имели возможность достаточно уверенно удалять

из суммарного одномерного спектра фоновые объекты, которые могли бы исказить картину химсостава ШС. Заметим, что другие авторы при получении интегрального спектра ШС обычно применяют сканирование области скопления движущейся щелью (см., например, [3]). Такой подход увеличивает вероятность попадания в результирующий спектр фоновых объектов, особенно в случае ШС, близких к плоскости Галактики.

Первичная обработка данных выполнена с использованием пакетов программ MIDAS [21] и IRAF.¹ В первую очередь производилась очистка спектральных изображений от следов космических частиц с помощью программы `filter/cosmic` в среде MIDAS. Маскировались горячие пиксели. Далее выполнялись шаги стандартной редукции спектров: вычитание `bias`, коррекция мелкомасштабных неоднородностей. Дисперсионное соотношение обеспечивало точность калибровки длин волн порядка 0.8 \AA . Одномерные спектры были экстрагированы с помощью процедуры IRAF `apsun`. Итоговое отношение сигнал/шум на пиксель в середине спектрального диапазона в полученных спектрах составило $S/N \approx 130$. Континуум в одномерных спектрах аппроксимировался с помощью функций MIDAS `filter/maximum` и `filter/smooth` (бегущая медиана). Анализ соответствия наблюдаемых и теоретических спектров выполнялся в графической среде Origin 6.1.

3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

Метод, использованный в данной работе, был впервые представлен в статье Шариной и др. [22]. Метод использует как спектральные, так и фотометрические наблюдательные и теоретические данные. Он основан на сравнении наблюдаемых спектров ШС с модельными, полученными суммированием индивидуальных синтетических спектров звезд разных масс, $\lg g$ и T_{eff} . Параметры звезд задаются изохроной, оптимально соответствующей диаграмме $C-M$ скопления. Метод определения химического состава и эволюционных параметров, описанный в этом разделе, применим к любому звездному скоплению, для которого имеется глубокая звездная фотометрия и длиннощелевой спектр, включающий в себя информацию о всех звездах скопления. Спектры центральных плотных областей ШС подходят как нельзя лучше для такого рода анализа. Наш метод применим к спектрам с разрешением $R > 2500$ с достаточно высоким отношением сигнал/шум ($S/N > 100$) и спектральным диапазоном не менее 1500 \AA .

3.1. Определение масс, $\lg g$ и T_{eff} звезд скоплений

Синтетические, бланкетированные спектры звездных атмосфер рассчитываются в соответствии с физическими параметрами звезд, определяемыми из сравнения наблюдаемых диаграмм $C-M$ скоплений с теоретическими изохронами Bertelli et al. [23].² Для выполнения работы мы выбрали изохроны Падуанской группы. Этот выбор определяется тем, что авторы включали в модели эволюционные стадии ГВ и асимптотической ветви гигантов, а также использовали широкий набор параметров: металличность $[\text{Fe}/\text{H}]$, возраст t и содержание гелия Y . Для скоплений NGC 6229 и NGC 6779 мы используем данные фотометрии звезд, опубликованные в статьях Piotto et al. [24] и Sarajedini et al. [10].

В ходе подбора теоретической изохроны, наилучшим образом соответствующей диаграмме $C-M$ скопления, мы варьируем пять параметров: возраст t , удельное содержание гелия Y , металличность $[\text{Fe}/\text{H}]$, избыток цвета $E(B - V)$ и расстояние до скопления. В качестве начальных значений параметров мы используем данные из литературы: компилятивного каталога Харриса [1] и статьи Ванденберга и др. [17], определивших параметры на основе звездной фотометрии Sarajedini et al. [10] и моделей Victoria-Regina [20]. Стартовые значения металличности и возраста ряда скоплений приняты согласно результатам работы Dotter et al. [11], полученным с применением изохрон Dartmouth [12].

Подбор изохрон выполняется следующим способом.

(1) Положение основных эволюционных последовательностей: главной, ветви субгигантов, ветви красных гигантов и горизонтальной ветви, — вычисляется по данным фотометрии как бегущая медиана с шагом $0^{\text{m}}1$ по двум координатам (цвету и звездной величине). Предварительно из используемой таблицы фотометрии должны быть убраны звезды с ошибками измерения звездных величин больше $0^{\text{m}}2$. Это слабые объекты. Обычно процент их обнаружения на хаббловских изображениях не превышает 50%. В результате, строится *огигающая* диаграммы $C-M$, описывающая положение основных эволюционных последовательностей скопления.

(2) Далее подбирается теоретическая изохрона минимально отклоняющаяся от огигающей. Это

¹<http://iraf.noao.edu>

²<http://stev.oapd.inaf.it/YZVAR/>

действие выполняется минимизацией по критерию χ -квадрат:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{I_o - I_m}{\sigma_{I_o}} \right]^2,$$

где I_o , σ_{I_o} — звездные величины огибающей с ошибками, I_m — соответствующие изохронные значения. Отметим, что мы не интерпретируем теоретические изохроны, а лишь используем имеющийся набор [23].

Изменение величины Галактического поглощения в направлении ШС и расстояние до скопления не влияет на наклон, форму и взаимное положение разных эволюционных последовательностей, а смещает диаграмму $C-M$ как целое. Изменение же $[Fe/H]$, t или Y влияет на положение и форму изохрон (см., например, объяснение в [23]). Оценка основных эволюционных параметров по диаграмме $C-M$ осуществляется с учетом этих изменений. В следующих шести абзацах мы объясняем принципы определения $[Fe/H]$, t и Y .

Подбор $[Fe/H]$ (t , Y неизменны) выполняется по степени наклона ветви красных гигантов [25] в качестве основного критерия. При увеличении $[Fe/H]$ наклон ветви растет, а светимость звезд вершины ветви красных гигантов падает все сильнее при $[Fe/H] \geq -0.8$ dex. Кроме того, с увеличением металличности вся изохрона сдвигается в красную сторону, светимость звезд на ней падает, а на ГВ оказывается все меньше голубых горячих звезд.

Подбор значения возраста ($[Fe/H]$ и Y неизменны) осуществляется с использованием температуры и светимости звезд точки поворота главной последовательности. При увеличении возраста положение точки поворота ГП смещается к более холодным и слабым звездам и дополнительно зависит от химсостава скопления. Светимость звезд ГВ определяется в основном металличностью и содержанием гелия. Существуют два основных и наиболее часто используемых эмпирических метода определения относительного возраста скоплений: вертикальный [26–28], учитывающий различия в светимостях точки поворота ГП и ГВ нулевого возраста ($\delta V = V_{TO} - V_{ZАНВ}$), и горизонтальный [29], опирающийся на разницу в температуре (цвете) между точкой поворота ГП и основанием ветви красных гигантов $\delta(B - V) = (B - V)_{RGB} - (B - V)_{TO}$.

В статье [27] дано приблизительное соотношение между δV , содержанием гелия Y и тяжелых элементов Z с одной стороны и логарифмом возраста с другой. Благодаря сильной зависимости светимости звезд ГВ от Y , а точки поворота ГП —

от Z , вертикальный метод дает лишь *относительные* возраста для скоплений, сходных по металличности и Y . Для определения *абсолютных* возрастов необходимо точное знание массовой доли гелия.

Сущность горизонтального метода состоит в измерении различия в цвете между точкой поворота ГП, которая чувствительна к возрасту, и ветвью красных гигантов, чувствительной к металличности. Это тоже относительный метод. Сравнимые скопления должны иметь одинаковые металличность и $[\alpha/Fe]$.

Необходимо отметить, что вертикальный и горизонтальный методы не требуют знания абсолютных расстояний и поглощения света до исследуемых объектов. Существуют многочисленные модификации этих двух подходов (см., например, [30, 31]). Имеется значительный разброс в результатах определения возраста одного и того же скопления различными способами. Авторы современных исследований используют метод максимального правдоподобия для подбора изохроны к диаграмме $C-M$ скопления как целому. Сходный подход применяем и мы. Оценка звездной величины точки поворота ГП трудна и зачастую вносит неопределенность в возраст порядка 10%. Поэтому приближение изохроной диаграммы $C-M$ как целого со всеми ее изгибами намного точнее. Поскольку мы используем не только фотометрические данные, характеризующие светимости и температуры звезд, но и спектроскопическую информацию о детальном химсоставе, то дальнейшее развитие нашего метода вероятно позволит оценивать абсолютные значения возраста скоплений.

Изменение Y в основном влияет на светимость и температуру звезд ГВ. Старые ШС имеют множество голубых звезд на ГВ, а зачастую и последовательность звезд пониженной светимости с температурами выше, чем у звезд ГВ [32].

После подбора $[Fe/H]$, t и Y по диаграмме $C-M$ рассчитывается спектр с модельными параметрами, соответствующими подобранной изохроне. Дальнейшее уточнение величин $[Fe/H]$, t и Y осуществляется с использованием спектроскопических данных (см. подробное объяснение в разделе 3.2). Длинная щель проходит через центр скопления. Следовательно, спектр компактных ШС включает информацию о всех звездах скопления. При условии отсутствия вклада ярких фоновых звезд интегральный спектр позволяет согласовать информацию, извлекаемую из диаграммы $C-M$, с результатами расчета синтетических спектров по моделям звездных атмосфер. Для расчетов спектров количество точек изохрон оптимизировалось путем исключения точек, имеющих вклад в полную светимость скопления менее 0.5%. Для оценки вклада отдельных точек в полное излучение

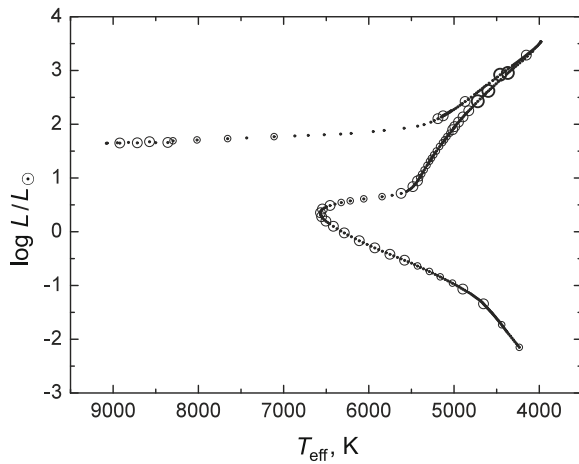


Рис. 1. Изохрона $\lg t = 10.1$, $Y = 0.26$, $Z = 0.0004$ для скопления NGC 6229. Кружками разного размера отмечены точки (в центрах кружков) со вкладом в полный поток излучения менее 1%, от 1% до 3% и более 3%.

скопления поток в континууме на длине волны $\lambda = 5000 \text{ \AA}$, вычисленный для модели атмосферы с параметрами данной точки (T_{eff} , $\lg g$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$), умножается на квадрат радиуса звезды, вес точки в полном интервале масс и текущее значение функции масс. Найденный таким образом поток излучения для данной точки в дальнейшем делится на суммарный поток от всех точек изохроны. На рис. 1 в центрах кружков разного размера находятся точки изохроны со вкладом в полное излучение NGC 6229 менее 1%, от 1% до 3% и более 3%.

Полученные результаты подбора изохран с использованием диаграммы $C-M$ и спектров для исследуемых шаровых скоплений показаны на левых панелях рис. 2–5. Справа представлены положения изохран при измененных параметрах. Для NGC 6229 показано изменение положения изохран при увеличении Y , для NGC 6779 — при увеличении возраста, а для NGC 5904 и NGC 6254 — при изменении Y и возраста. Для двух последних скоплений показаны изохраны с параметрами, близкими к определенным в [29]. Расстояние и $E(B - V)$ изменялись в соответствии с варьированием названных выше параметров. Можно заметить, что для всех ШС существуют отдельные звезды и последовательности, не описываемые изохронами. Это горячие голубые звезды на продолжении ГВ, голубые бродяги, отдельные яркие звезды, отклоняющиеся от ветви красных гигантов (фоновые объекты или звезды асимптотической ветви гигантов). В разделе 3.2 будет обсуждаться вопрос о значимости перечисленных отклонений при анализе соответствия теоретических спектров, рассчитанных с использованием принятых изохран,

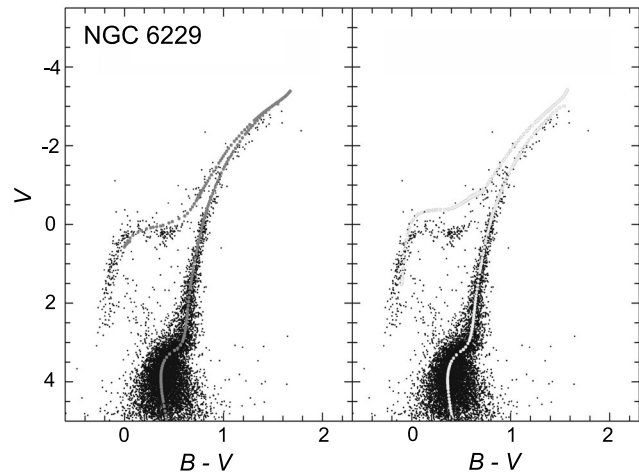


Рис. 2. Сравнение $C-M$ диаграммы $V-(B - V)$ скопления NGC 6229 [24] с изохронами из статьи Bertelli et al. [23]. На левой панели показана изохрона $\lg t = 10.1$, $Y = 0.26$, $Z = 0.0004$, использованная при моделировании спектра ШС. На правой панели приведена для сравнения изохрона $\lg t = 10.1$, $Y = 0.3$ при $Z = 0.0004$ (см. раздел 3.1).

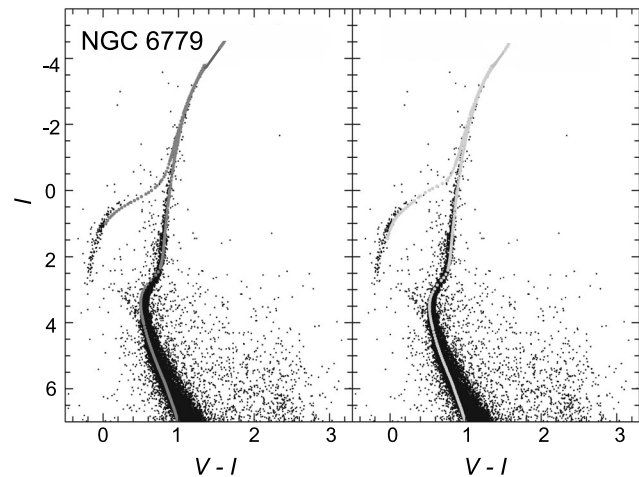


Рис. 3. Сравнение $C-M$ диаграммы $I-(V - I)$ скопления NGC 6779 [10] с изохронами из статьи [23]. На левой панели показана изохрона $\lg t = 10.1$, $Y = 0.23$, $Z = 0.0001$, использованная при моделировании спектра ШС. На правой панели приведена для сравнения изохрона $\lg t = 10.15$, $Y = 0.23$, $Z = 0.0001$.

наблюдаемым спектрам. На рис. 6–9 показаны участки спектров с водородными линиями, рассчитанными с параметрами изохран, использованными на рис. 2–5. В качестве окончательных нами были приняты $[\text{Fe}/\text{H}]$, t и Y , лучше всего описывающие наблюдаемые спектры.

Результаты подбора изохран для хорошо изученных скоплений NGC 5904 и NGC 6254 (рис. 4 и 5) согласуются с литературными значе-

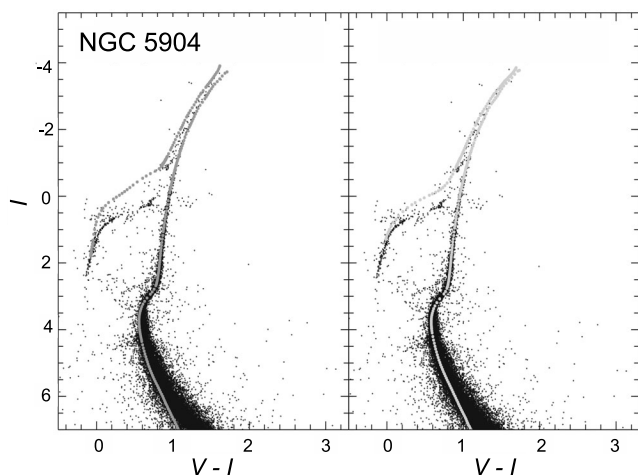


Рис. 4. Сравнение $C-M$ диаграммы $I-(V-I)$ скопления NGC 5904 [24] с изохронами из статьи [23]. На левой панели показана изохрона $\lg t = 10.1$, $Y = 0.30$, $Z = 0.001$, использованная при моделировании спектра ШС. На правой панели приведена для сравнения изохрона $\lg t = 10.15$, $Y = 0.26$ при $Z = 0.001$ (см. раздел 3.1).

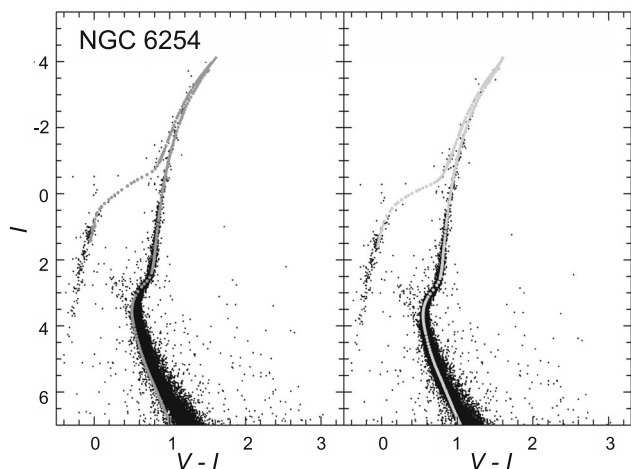


Рис. 5. Сравнение $C-M$ диаграммы $I-(V-I)$ скопления NGC 6254 [10] с изохронами из статьи [23]. На левой панели показана изохрона $\lg t = 10.05$, $Y = 0.30$, $Z = 0.0004$, использованная при моделировании спектра ШС. На правой панели приведена для сравнения изохрона $\lg t = 10.15$, $Y = 0.26$, $Z = 0.0004$.

ниями (таблица 3) [1, 17]. Различия в определении возраста не превышают миллиарда лет. Однако для всех скоплений, кроме NGC 6779, имеется систематическое занижение величины $[Fe/H]$ на 0.1–0.3 dex. Для двух тестовых скоплений содержание гелия оказалось выше, чем в результатах фотометрических исследований VandenBerg et al. [17]. Содержание α -элементов для NGC 6254, измеренное нами, оказалось на 0.2–0.3 dex ниже

литературного. В целом наши ошибки определения основных характеристик скоплений не превышают 20%.

Необходимо отметить, однако, общую проблему (нашу и литературную) описания диаграммы $C-M$ скоплений с помощью эволюционных треков и изохрон. Фактически ни одна из представленных изохрон не описывает диаграммы $C-M$ скопления во всех деталях. Принятые нами изохроны обеспечивают наилучшее из всех возможных вариантов согласие между наблюдаемыми и теоретическими спектрами, рассчитанными с использованием распределения звезд по массам, $\lg g$, T_{eff} , соответствующим этим изохронам. Отметим, что помимо наличия вышеупомянутых отдельных звезд с заметными отклонениями от изохроны в некоторых случаях (см., например, рис. 4) анализ спектра предполагает небольшой сдвиг точки поворота ГП в сторону более высоких температур или изменение положения ГВ. Для NGC 5904 такие изменения могут быть вызваны повышенным процентом голубых горячих звезд ГВ, ЕНВ (Extended Horizontal Branch) и/или голубых бродяг, попавших в щель спектрографа.

3.2. Моделирование спектров звезд

Количество звезд заданной массы вычисляется согласно функции масс Chabrier [33]. При получении синтетических спектров плоскопараллельных, гидростатических атмосфер звезд для полученных изохронных значений параметров (T_{eff} , $\lg g$, $[Fe/H]$) мы используем программный комплекс CLUSTER [22]. Модели атмосфер рассчитываются интерполяцией сеток Каstellли и Куруца [34] по методике, описанной в [35]. Для выполнения нормировки одновременно моделируются два спектра: (1) с учетом атомных линий и молекулярных полос в исследуемом спектральном диапазоне и (2) без учета. Таким образом, синтетические спектры, участвующие в моделировании, получают делением (1) на (2). Заметим, что при моделировании для всех спектров принят постоянный шаг по длине волны $\Delta\lambda = 0.05 \text{ \AA}$, обеспечивающий ошибки потока в континууме и линиях не более 0.005% остаточной интенсивности. При анализе спектров умеренного разрешения ($\text{FWHM} \leq 5 \text{ \AA}$) возможно исследование не отдельных линий, а широких бленд $\Delta\lambda \geq 5 \text{ \AA}$, состоящих из линий и полос многих атомов и молекул. Поэтому для определения параметров и химического состава скоплений необходимо достичь наилучшего согласия теоретических и наблюдаемых спектров во всем изучаемом диапазоне. Как показал анализ в статье [22], при $S/N > 100$ этот подход позволяет определить параметры скопления и содержания

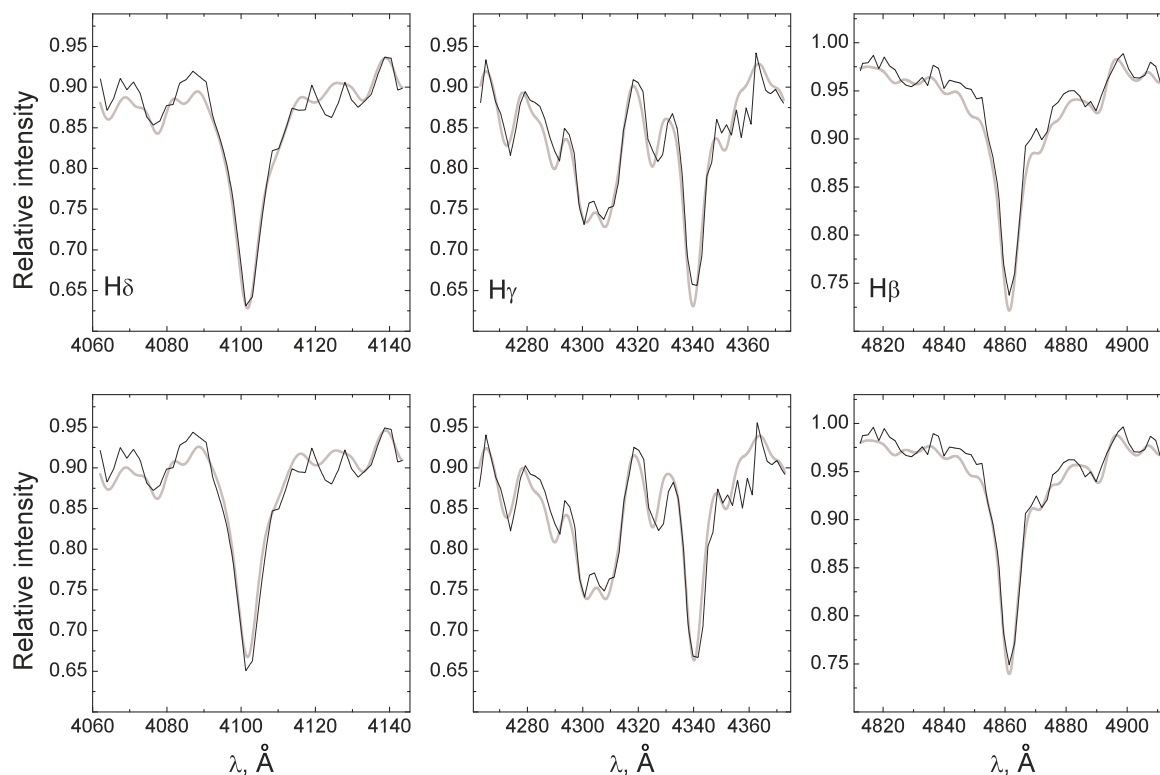


Рис. 6. Проверка соответствия параметров изохроны наблюдаемому спектру NGC 6229 по профилям линий $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$. На трех верхних панелях показана использованная нами модель $\lg t = 10.1$, $Y = 0.26$, $Z = 0.0004$ (см. соответствующую диаграмму $C-M$ на рис 2 слева). На трех нижних панелях приведена для сравнения модель $\lg t = 10.1$, $Y = 0.30$ при $Z = 0.0004$ (рис. 2 справа).

примерно 10 химических элементов. Значения содержаний, определенные нами по сильным линиям и бледам Ca, Mg, Fe, CN, большинству линий Na, Al, Ba, Sr и всем линиям с $\lambda > 5300 \text{ \AA}$, являются дифференциальными, так как для них используются эмпирические силы осцилляторов gf , полученные в статье [36] при анализе спектра Солнца. Для остальных линий используются теоретические значения gf , что с учетом анализа Шиманской и др. [36] может вызывать систематическое занижение содержаний элементов до 0.07 dex. Единая для звезд ШС скорость микротурбуленции ξ_{turb} (таблица 3) определяется из условия наилучшего согласия сильных и слабых линий железа в теоретических и наблюдаемых спектрах. Примеры изменения линий Fe при различных значениях ξ_{turb} приведены на рис. 10–13. Полученные нами величины ξ_{turb} даны в таблице 3. Отметим, что использование единого значения ξ_{turb} для всех звезд скопления является не совсем корректным. Однако анализ интегральных спектров ШС не позволяет найти зависимость ξ_{turb} от параметров звезд. Кроме того, основной вклад в оптические спектры ШС вносят звезды, лежащие в точке схода с ГП при $T_{\text{eff}} = 6200\text{--}7500 \text{ K}$ и наиболее яркие гиганты на

асимптотической ветви. Для звезд данных типов скорость микротурбуленции заключена в диапазоне $\xi_{\text{turb}} = 1.8\text{--}2.4 \text{ km s}^{-1}$. Поэтому применение единого значения ξ_{turb} в целом не может приводить к значительным ошибкам содержаний химических элементов. Макротурбуленция и вращение для отдельных звезд, входящих в скопление, не учитывается в расчетах, так как эти эффекты составляют менее 30 km s^{-1} и, следовательно, незначительны при нашем разрешении. По этой же причине не принимается во внимание дисперсия скоростей звезд, входящих в скопление.

Приведение континуума наблюдаемых спектров к уровню теоретических выполняется последовательным применением цифровых фильтров (см. описание MIDAS³ для получения более подробной информации): (1) находящего максимальные значения интенсивности в спектре в заданном окне по длине волны (5 FWHM), (2) сглаживающего фильтра (бегущая медиана) с окном 6 FWHM, где под FWHM подразумевается спектральное разрешение прибора в \AA .

³<http://www.eso.org/sci/software/esomidass/doc/user/98NOV/vol1b/>

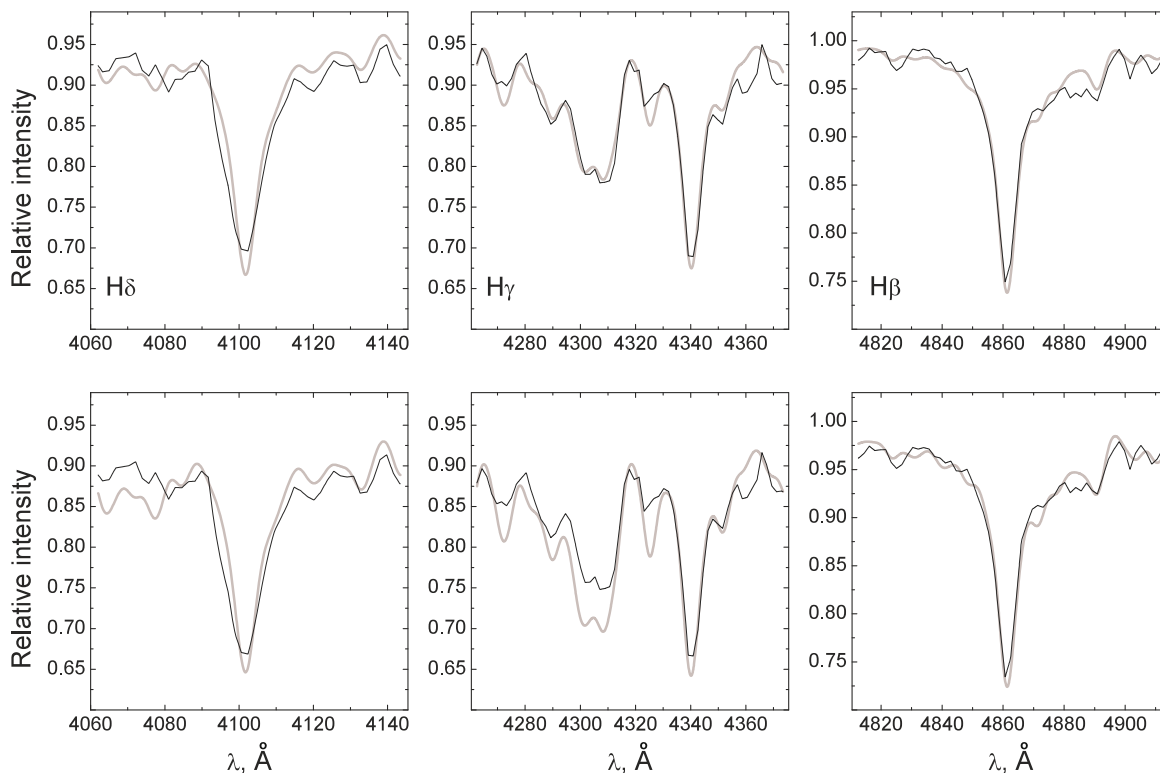


Рис. 7. Проверка соответствия параметров изохроны наблюдаемому спектру NGC 6779 по профилям линий $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$. На трех верхних панелях показана использованная нами модель $\lg t = 10.1$, $Y = 0.23$, $Z = 0.0001$ (см. соответствующую диаграмму $C-M$ на рис. 3 слева). На трех нижних панелях приведена для сравнения модель $\lg t = 10.15$, $Y = 0.23$, $Z = 0.0001$ (рис. 3 справа).

Вклад различного типа звезд в интегральное излучение ШС рассмотрен на примере NGC 6229 на рис. 14. Это скопление имеет ГВ промежуточного типа, однако ее голубой и красный концы густо населены звездами. Голубые горячие звезды ГВ ответственны за ширину и интенсивность линий водорода. Эти объекты дают вклад до 40% в распределение энергии в голубой части исследуемого спектрального диапазона. Красные гиганты, доминирующие в его красной части, являются основным источником молекулярных полос и линий нейтральных атомов тяжелых элементов. Отметим, что молекулярные линии в суммарном спектре звезд ветви красных гигантов выражены намного сильнее, чем в спектре звезд ГП и ветви субгигантов. В результате интегральный спектр всего скопления имеет заметные отличия от спектров всех его компонент.

3.3. Определение химического состава

Варьирование $[Fe/H]$, $\lg g$ и T_{eff} позволяет рассчитать спектры разных звезд, входящих в скопления. Суммирование этих спектров с учетом функции масс звезд дает возможность составить полный синтетический спектр ШС.

Средние содержания химических элементов в атмосферах звезд ШС определяются методом согласования наблюдаемых и теоретических профилей линий, бленд линий и молекулярных полос. Как было объяснено в предыдущем разделе, разрешение наших спектров не позволяет получить содержание химических элементов по отдельным линиям. Вследствие этого мы принимали такое содержание каждого элемента, при котором все бленды, включающие линии этого элемента в исследуемом интервале длин волн, наилучшим образом описываются теоретическим спектром.

Вначале мы определяем содержание элементов, линии и/или молекулярные полосы которых доминируют в спектрах, что позволяет однозначно получить значения $[X/H]$ с точностью $\Delta[X/H] \sim 0.1-0.2$ dex. К таким элементам относятся Fe, Ca, Mg, C. Профили линий Ti, Cr, Co, Mn, N анализируются варьированием их содержаний, используя ранее найденные фиксированные содержания элементов первой группы. Точность оценки содержаний элементов второй группы, линии которых являются намного более слабыми и блендированными по сравнению с элементами первой группы, составляет прибли-

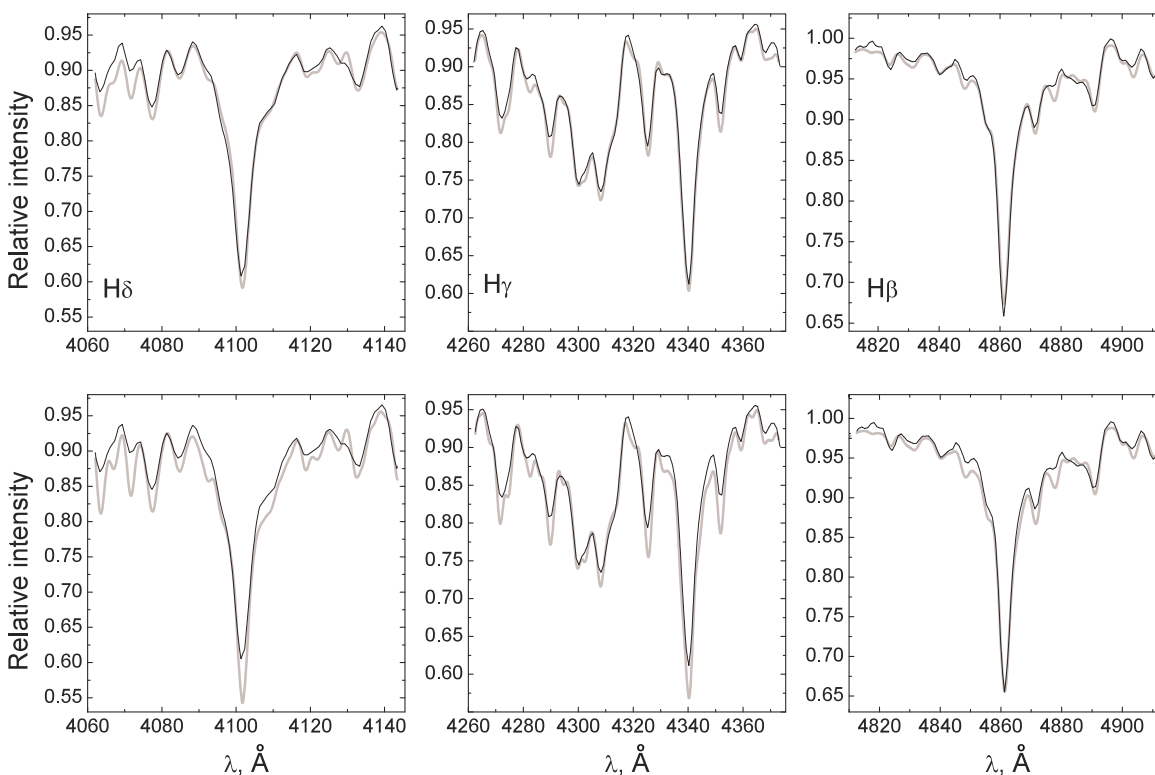


Рис. 8. Проверка соответствия параметров изохроны наблюдаемому спектру NGC 5904 по профилям линий $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$. На трех верхних панелях показана использованная нами модель $\lg t = 10.1$, $Y = 0.30$, $Z = 0.001$ (см. соответствующую диаграмму $C-M$ на рис. 4 слева). На трех нижних панелях приведена для сравнения модель $\lg t = 10.15$, $Y = 0.26$ при $Z = 0.001$ (рис. 4 справа).

зительно 0.2–0.3 dex. Отдельные элементы при использовании спектров умеренного разрешения не имеют заметных деталей в исследуемом диапазоне длин волн, но влияют на молекулярное и ионизационное равновесие других элементов. К подобным элементам относится кислород, с повышением содержания которого часть атомарного углерода дополнительно участвует в формировании молекулы CO, что уменьшает интенсивность молекулярных полос CN и CH. Элементы Al, Si, V, Ni незначительно влияют на электронное равновесие в атмосферах звезд и также не имеют различимых при умеренном разрешении линий. В последнюю группу следует включить Na, резонансные линии которого сильно искажены межзвездными линиями и не пригодны для анализа.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для скоплений NGC 6229 и NGC 6779 содержания химических элементов определены нами впервые. Итоговые результаты для них и скоплений сравнения NGC 5904 и NGC 6254 представлены в таблицах 3–5 и на рис. 10–13. Таблица 3 суммирует значения фундаментальных параметров

скоплений: возраст, содержание гелия, средние для ШС содержания железа $[Fe/H]$ и α -элементов. В таблицах 4 и 5 приведены содержания отдельных химических элементов. На рис. 6–9 показаны результаты сравнения наблюдаемых и теоретических профилей линий $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$, рассчитанных на основе изохрон с параметрами, полученным по фотометрическим данным (см. выше). На рис. 10–13 показаны профили линий и молекулярных полос различных химических элементов, по которым были измерены их содержания. Профили линий каждого элемента приведены в 2–3 вариантах принятых содержаний для оценки надежности и возможных ошибок их определения. Необходимо отметить, что приближение наблюдаемого спектра теоретическим предполагает, что в этих двух спектрах достаточно полно представлено излучение звезд ШС в основных эволюционных стадиях. Также предполагается, что наблюдаемый спектр не искажен фоновыми объектами. В действительности последнее условие не всегда выполняется, особенно в случае ШС, расположенных близко к плоскости Галактики. Наблюдения с разной ориентацией щели в большинстве случаев позволяют исключить искажения от звезд фона. Спектры те-

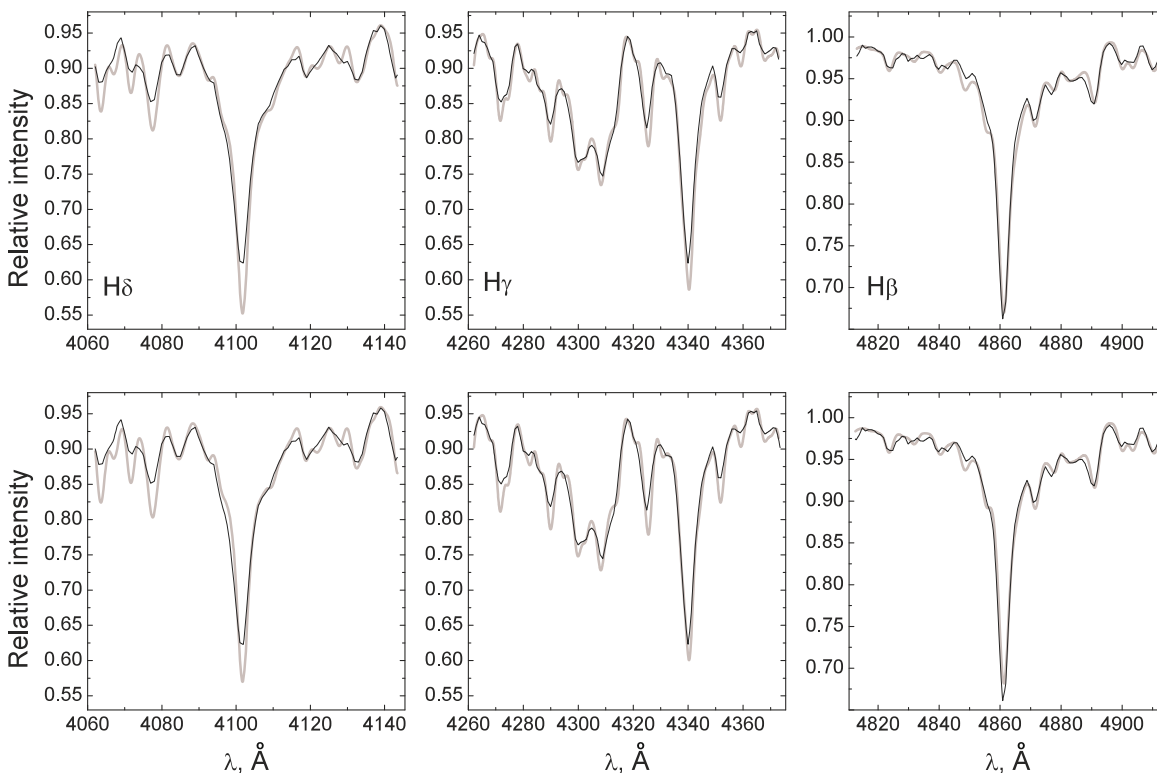


Рис. 9. Проверка соответствия параметров изохроны наблюдаемому спектру NGC 6254 по профилям линий $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$. На трех верхних панелях показана использованная нами модель $\lg t = 10.05$, $Y = 0.30$, $Z = 0.0004$ (см. соответствующую диаграмму $C-M$ на рис. 5 слева). На трех нижних панелях приведена для сравнения модель $\lg t = 10.15$, $Y = 0.26$, $Z = 0.0004$ (рис. 5 справа).

стовых ШС из работы Schiavon et al. [3] получены с применением метода сканирования скопления длинной щелью, и поэтому могут содержать такие искажения.

Как отмечено во Введении, по литературным результатам глубокой звездной фотометрии были определены возраст, $[Fe/H]$ и Y . Резюме этих оценок представлено в таблице 3. В целом наши результаты определения этих параметров, полученные путем анализа спектров скоплений, согласуются с литературными. Однако имеется ряд расхождений. Для хорошо изученного ШС NGC 5904 наша оценка возраста превышает на 0.9 млрд лет значение, полученное в [17], а содержание гелия избыточно. Данные параметры определяются из анализа профилей линий $H\text{I}$, как объяснено в разделе 3.2. Наши значения $[Fe/H]$, найденные спектроскопическим методом, в большинстве случаев ниже литературных, полученных с помощью анализа диаграммы $C-M$, на 0.2–0.3 dex. Маловероятно, чтобы данные различия являлись следствием попадания в щель излучения фоновых звезд. Проекционные окрестности исследованных скоплений содержат в основном звезды диска с металличностью порядка солнечной. Эмиссий в

наблюдаемых спектрах скоплений мы не обнаружили. Таким образом, отмеченные различия связаны скорее всего с особенностью применяемых методик и моделей. При анализе фотометрических данных ошибки показателей цвета и расстояний до скоплений, а также применение теоретических изохрон разных авторов обуславливают появление случайных и систематических сдвигов в полученных наборах параметров [38]. Использование авторами разных наборов атомных и молекулярных данных, моделей звездных атмосфер и принципов построения моделей простых звездных населений приводят к отличиям в результатах определения химсостава и эволюционных параметров скоплений.

Сравнение наших результатов определения содержаний различных элементов с данными из работ [39] и [31] для хорошо изученных скоплений NGC 5904 и NGC 6254 показано в таблицах 4 и 5 и на рис. 15 и 16. Различия в содержаниях больше объявленных ошибок имеются только для C и N. Возможное объяснение состоит в том, что мы анализируем средний химсостав скопления в целом, а не только звезд высокой светимости, как делается в большинстве исследований других авторов. На

Таблица 3. Сравнение литературных [1, 17] и определенных нами фотометрическим и спектральным методами значений $[Fe/H]$ в dex, содержания гелия Y , возраста t в млрд лет, содержания α -элементов $[\alpha/Fe] = ([Mg/Fe] + [Ca/Fe]) / 2$ в dex и средней для каждого скопления скорости микротурбуленции ξ_{turb} в км с⁻¹. Параметр $HBR = (B - R)/(B + V + R)$ [1] характеризует количество звезд в голубой и красной частях горизонтальной ветви и в пробеле Герцшпрунга

Parameter	NGC 6229	NGC 6779	NGC 5904	NGC 6254	Ref.
$[Fe/H]$, dex	-1.43	-1.94	-1.27	-1.52	[1]
HBR	0.24	0.98	0.31	0.98	[1]
$[\alpha/Fe]$	-	-	0.21	0.26	[37]
$[\alpha/Fe]$	-	-	0.31	0.39	[31]
$[Fe/H]$	-	-2.00	-1.33	-1.57	[17]
t	-	12.75 ± 0.50	11.50 ± 0.25	11.75 ± 0.38	[17]
Y	-	0.25	0.25	0.25	[17]
$[Fe/H]_{isochr.}$	-1.74	-2.35	-1.33	-1.74	our
$t_{isochr.+spectra}$	12.6	12.6	12.6	11.2	our
$Y_{isochr.+spectra}$	0.26	0.23	0.30	0.30	our
$[Fe/H]_{spectra}$	-1.65	-1.9	-1.6	-1.75	our
$[\alpha/Fe]_{spectra}$	0.28	0.08	0.35	0.025	our
ξ_{turb}	2.1	2.1	2.1	1.8	our

Таблица 4. Определенные содержания $[X/Fe]$ в dex и дисперсии содержаний σ в dex химических элементов в NGC 6229 и NGC 5904

Elem.	NGC 6229		NGC 5904		NGC 5904 [31]	
	$[X/Fe]$	σ	$[X/Fe]$	σ	$[X/Fe]$	σ
C	-0.05	0.15	-0.20	0.10	-0.48	0.26
N	0.35	0.25	0.20	0.20	0.68	0.59
O	0.35	0.30	0.20	0.30	0.15	0.27
Na	0.25	0.20	0.20	0.15	0.19	0.26
Mg	0.15	0.15	0.40	0.15	0.33	0.10
Ca	0.40	0.15	0.20	0.10	0.28	0.11
Ti	0.40	0.25	0.20	0.20	0.22	0.10
Cr	0.15	0.20	0.10	0.15	-0.08	0.19

Таблица 5. Определенные содержания $[X/Fe]$ в dex и дисперсии содержаний σ в dex химических элементов в NGC 6779 и NGC 6254

Elem.	NGC 6779		NGC 6254		NGC 6254 [39]	
	$[X/Fe]$	σ	$[X/Fe]$	σ	$[X/Fe]$	σ
C	-0.15	0.15	-0.15	0.10	-0.77	0.37
N	-0.10	0.25	0.25	0.20	1.01	0.45
O	-0.20	0.30	0.40	0.30	0.23	0.24
Na	-0.20	0.20	0.25	0.15	0.17	0.27
Mg	-0.10	0.15	0.05	0.15	0.44	0.13
Ca	0.25	0.15	0.00	0.10	0.33	0.11
Ti	0.10	0.25	0.45	0.20	0.26	0.12
Cr	-0.10	0.20	-0.09	0.15	0.001	0.15

поверхность таких звезд могут быть вынесены продукты CNO-цикла, что ведет к повышению содержаний азота и уменьшению содержания углерода. Заметим, что значительный вклад красных гигантов в спектр скопления, вероятно, увеличивает искажения определенных нами содержаний C и N,

но их амплитуда должна быть много меньше, чем при исследовании отдельных звезд. Существенные различия также есть в содержаниях Mg и Ca для NGC 6254. Значительные вариации C, N, O, Mg, Na и Al от звезды к звезде были обнаружены у ряда массивных Галактических ШС [37]. Зачастую

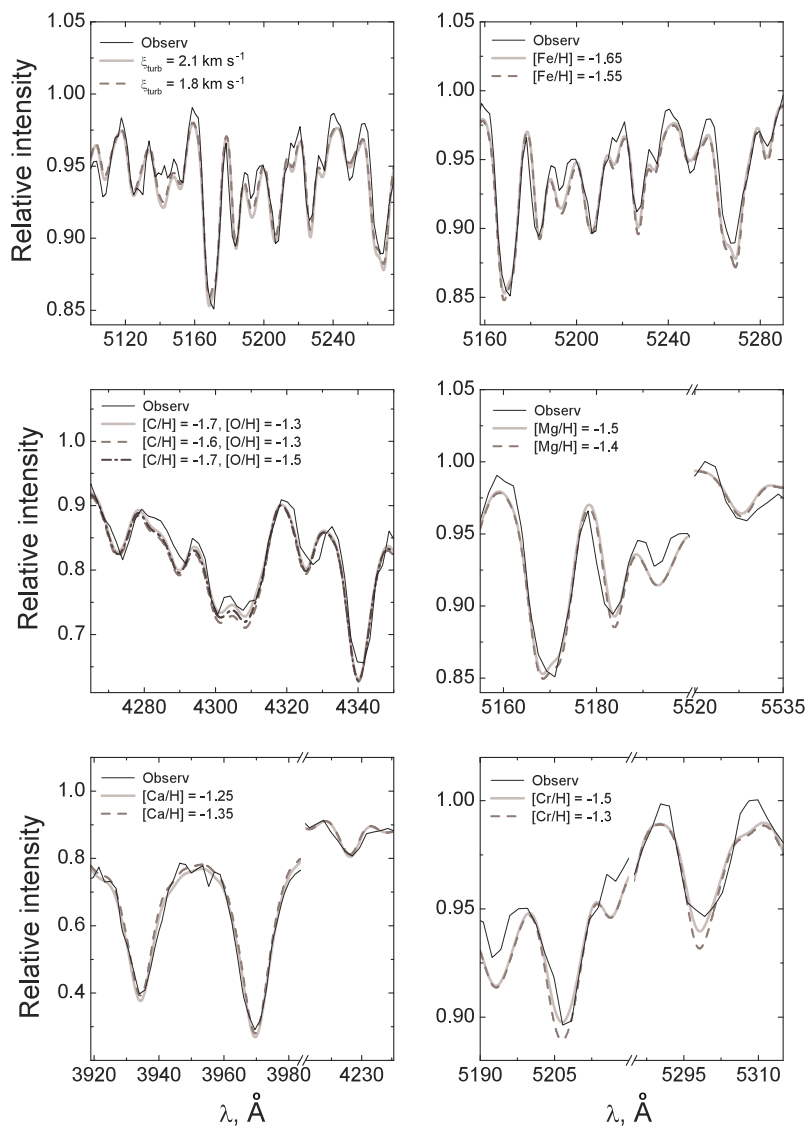


Рис. 10. Определение скорости микротурбуленции ξ_{turb} и содержаний Fe, C, Mg, Ca и Cr для NGC 6229. Показаны наблюдаемый спектр (сплошные линии) и теоретические спектры (штриховые, штрих-пунктирные и пунктирные линии), рассчитанные для разных значений $[X/H]$ при неизменном содержании других элементов (см. разделы 3.2, 4).

у одного и того же скопления наблюдаются два или несколько звездных населений с различным химическим составом, образующих различные последовательности на диаграмме $C-M$. Объясняется это перемешиванием с веществом, прошедшим CNO-цикл. Вариации в содержании Mg в результате таких процессов ожидаются порядка $\Delta \text{Mg} \leq 0.3 \text{ dex}$ [39]. Отметим еще раз, что литературные оценки базируются в основном на исследованиях красных гигантов, которые не являются реальными индикаторами первичного химического состава ШС из-за процессов перемешивания вещества, которым подвержены их атмосферы (first dredge-up). Поэтому необходимы более детальные теоретические и наблюдательные исследования, чтобы проверить,

насколько вариации химического состава в скоплениях зависят от физических характеристик изучаемых звезд.

Почти все полученные нами содержания неплохо согласуются с теоретическими расчетами моделей химической эволюции Галактики, а также со средними значениями для звезд-карликов при данной металличности (см. [40–42]). Однако разброс наблюдаемых значений, с которыми сравниваются модельные характеристики, зачастую велик.

Углерод производится тройным α -процессом при гидростатическом горении He в звездах разных масс. Среднее содержание C в карликах гало и диска почти не меняется со временем (не зависит от

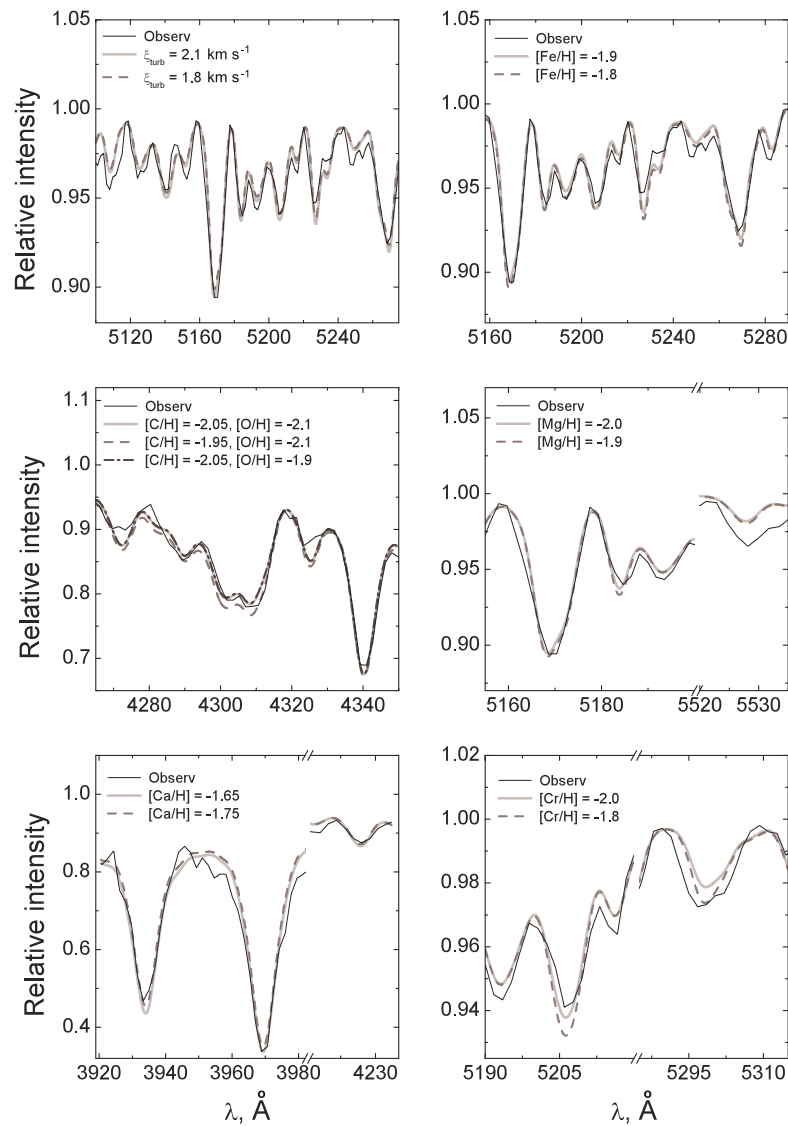


Рис. 11. То же, что на рис. 10, только для NGC 6779.

[Fe/H]): [C/Fe] \sim 0 [41]. У нас получились похожие значения.

Содержание азота стремительно падает при уменьшении металличности, так как массивные звезды не производят первичного N. С увеличением [Fe/H] растет производство так называемого вторичного N звездами умеренных масс до тех пор, пока производство Fe сверхновыми Ia не компенсирует этот процесс при [Fe/H] \sim -1. Теоретические значения [N/Fe] составляют от 0 до -0.5 в интервале $-2 < [Fe/H] < 1$. Наши оценки лежат ближе к теоретическим значениям, чем данные из литературы для гигантов в NGC 5904 и NGC 6254.

Кислород, как и большинство других α -элементов производится исключительно массивными звездами. [O/Fe] \sim 0.5 при [Fe/H] \leq 1. Наши значения вполне соответствуют этим расчетам,

за исключением NGC 6779, для которого получились пониженные оценки содержаний и для других α -элементов. Эмиссий и заметной примеси фоновых звезд в спектрах не было обнаружено. Однако последнее обстоятельство полностью исключить нельзя для NGC 6779, которое находится ближе к плоскости Млечного Пути, чем другие три скопления.

Эволюцию содержания магния в зависимости от металличности не удается объяснить только образованием его в массивных звездах ([41] и ссылки в этой статье). Теоретические значения [Mg/Fe] в интервале $-2 < [Fe/H] < 1$ обычно немного ниже наблюдаемых. Наши результаты более согласуются с теоретическими значениями. Однако необходимо отметить, что разброс в наблюдательных данных велик. В целом, можно сделать вывод, что

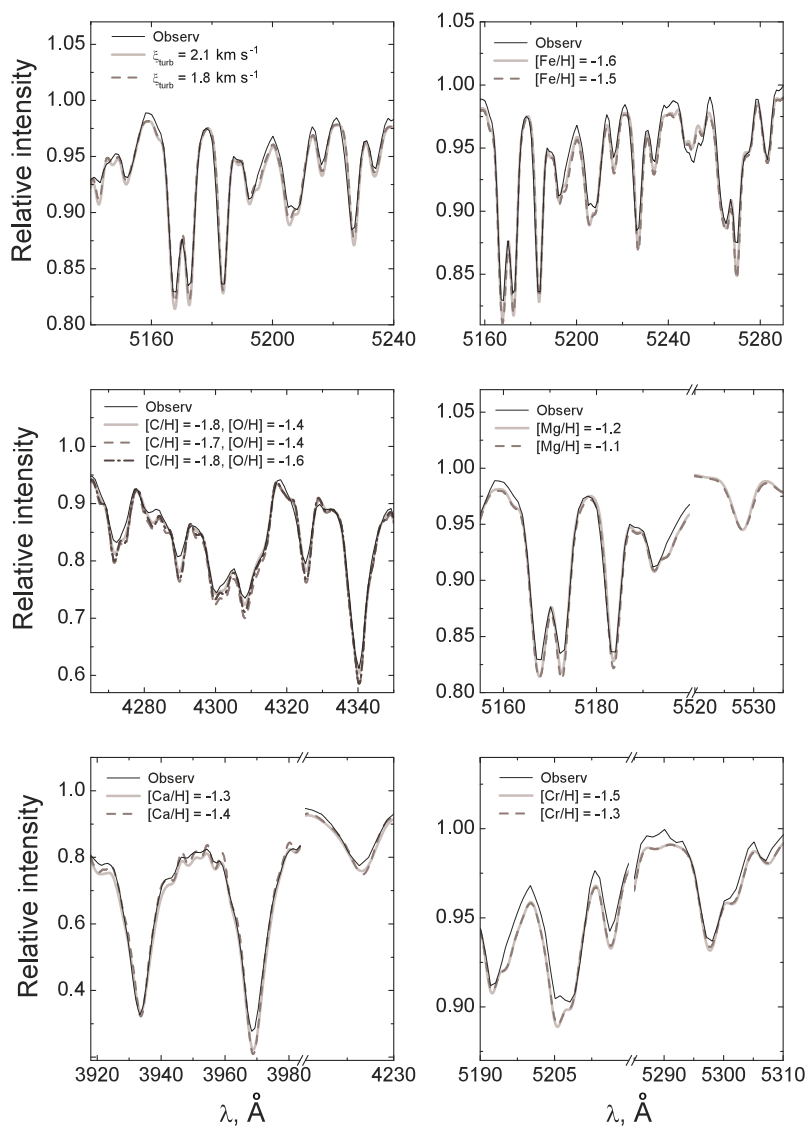


Рис. 12. То же, что на рис. 10, только для NGC 5904.

значения $[Mg/Fe]$ для скоплений нашей выборки, за исключением NGC 6779, находятся в пределах нормы.

Значение $[Ca/Fe]$ неплохо согласуется с теорией для всех скоплений нашей выборки, кроме NGC 6254. Мы определяли содержание этого элемента не только по резонансной линии Ca I λ 4226 Å, но и по линиям H и K Ca II, профили которых сильно изменяются в зависимости от выбранной изохроны, так как зависят не только от содержания Ca, но и от возраста, Y и $[Fe/H]$. Поэтому ошибка в оценке $[Ca/Fe]$ возможна, но гораздо менее вероятна, чем возможные неточности для элементов тяжелее Ca, которые не имеют широких спектральных деталей.

Из таблиц 4 и 5 и рис. 15 и 16 видно, что химические составы NGC 5904 и NGC 6254 у нас в целом

оказались сходными с таковыми для NGC 6229 и NGC 6779. Литературные значения $[Fe/H]$ для NGC 6779 и NGC 6254 ниже, чем соответствующие величины для NGC 6229 и NGC 5904. Данное обстоятельство при сходстве структур горизонтальных ветвей NGC 6229 и NGC 5904, а также NGC 6779 и NGC 6254 послужило поводом отнести скопления с более высокой металличностью к молодому Галактическому гало, а с меньшей металличностью — к старому [2]. Согласно нашим результатам (см. таблицу 3), среди четырех ШС нет двух объектов, полностью похожих по всем параметрам. Сходство же химического состава скорее всего свидетельствует о том, что все они являются представителями старого Галактического гало, процессы нуклеосинтеза в котором протекали в соответствии с основными этапами эволюции под

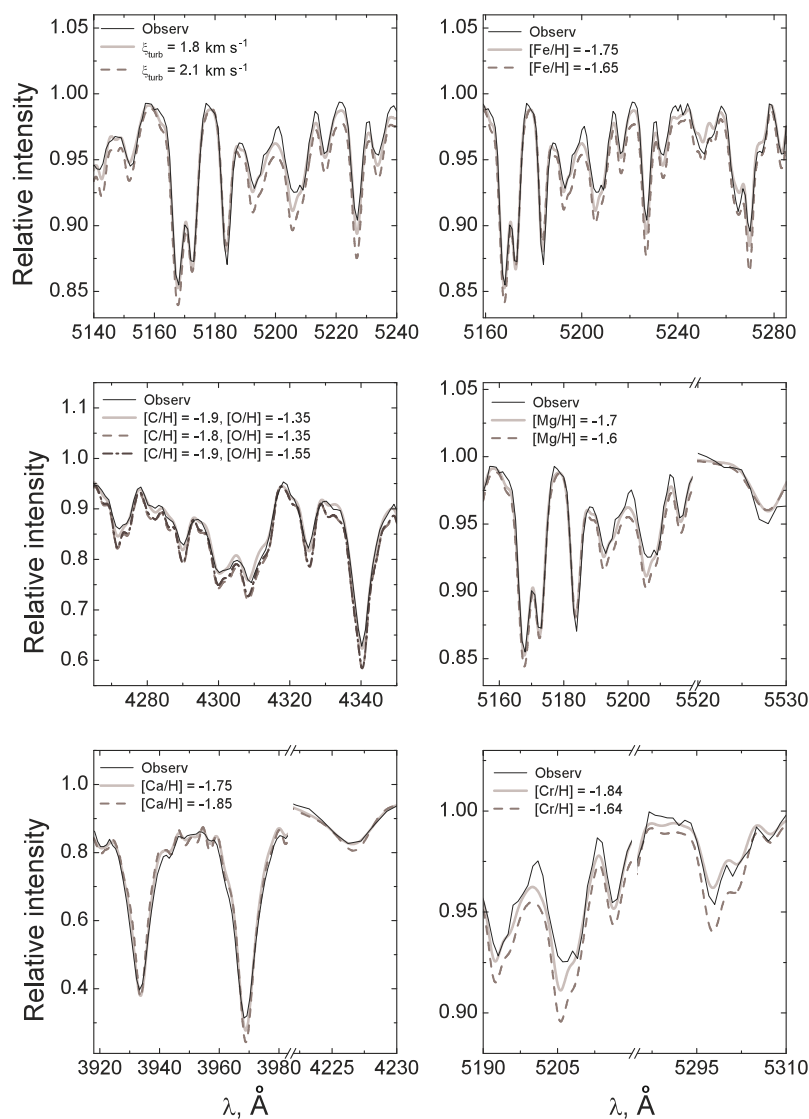


Рис. 13. То же, что на рис. 10, только для NGC 6254.

воздействием сверхновых SN II и SN Ia. Необходимо более точный анализ химических, кинематических и структурных характеристик скоплений для решения вопроса о принадлежности их к той или иной подсистеме Галактики.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Использованный нами метод моделирования и анализа интегральных спектров скоплений ранее был представлен в статье [22]. В данной работе мы развили его, включив изучение диаграмм $C-M$ скоплений и детальное сравнение их с теоретическими изохронами. Таким образом, сейчас метод сочетает в себе возможности использования как спектроскопической, интегрированной вдоль щели, так и фотометрической информации о звездных

населениях скоплений. Мы используем результаты глубокой звездной фотометрии из литературы для подбора изохроны, наилучшим образом соответствующей диаграмме $C-M$ скопления. Суммирование синтетических бланкетированных спектров звезд, рассчитанных методом моделей атмосфер, производится в соответствии с функцией светимости звезд Chabrier [33]. Согласование теоретического и наблюдаемого спектров скоплений выполняется итерационно в несколько этапов. В качестве начального приближения распределение звезд скопления по массам, радиусам и $\lg g$ задается с использованием литературных данных о теоретической изохроне, наилучшим образом соответствующей наблюдаемой диаграмме $C-M$. Для уточнения возраста и содержания гелия в звездах анализируются профили линий нейтрального

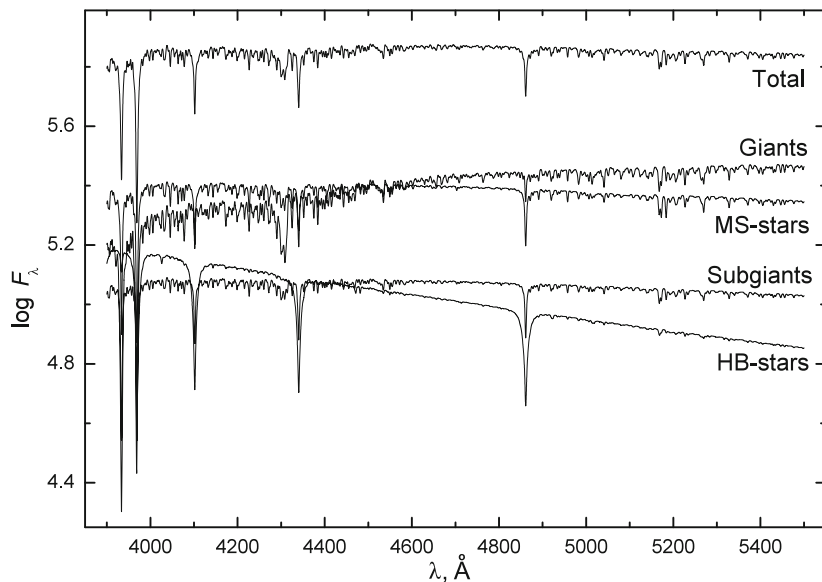


Рис. 14. Вклад различных типов звезд в интегральное излучение ШС. Рассмотрен пример NGC 6229.

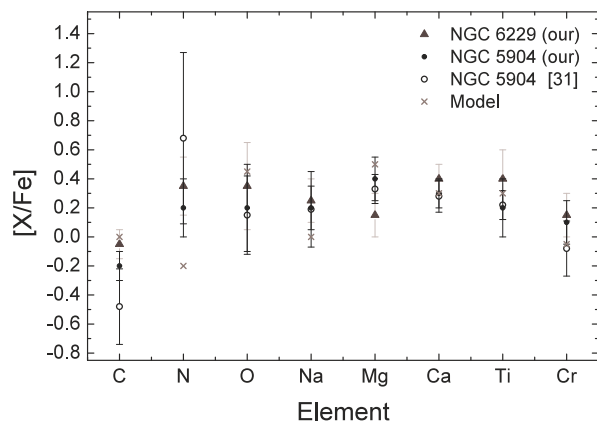


Рис. 15. Сравнение содержаний химических элементов в NGC 6229 и в NGC 5904 по результатам данной работы. Незакрашенными кружками показаны данные из [31].

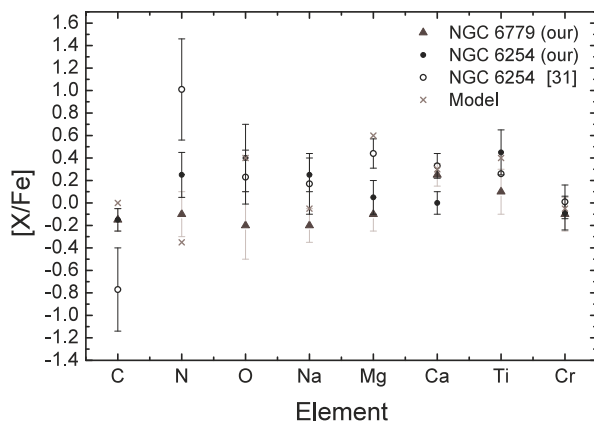


Рис. 16. Сравнение содержаний химических элементов в NGC 6779 и в NGC 6254 по результатам данной работы. Незакрашенными кружками показаны данные из [31].

водорода, так как они практически не зависят от других параметров. Затем варьируется содержание железа, линии которого преобладают в оптическом спектре даже при низкой металличности. После достижения наилучшего согласия по этим трем параметрам находятся содержания α -элементов Mg, Ca и C. Молекулярные полосы и линии данных элементов являются наиболее существенными деталями в спектре. Для определения содержаний других элементов используются сложные бленды из многих линий. В итоге оцениваются содержания порядка 10 элементов. Отметим, что использование значительного числа линий с эмпирическими

значениями gf позволяет получать дифференциальные значения содержаний (то есть привязанные к значениям gf линий в спектре Солнца) Ca, Mg, Fe, C, а в некоторых случаях и других элементов.

В данной работе с использованием разработанного нами метода оценены возраст, удельное содержание гелия Y и содержания Fe, C, N, O, Na, Mg, Ca, Ti и Cr для четырех Галактических ШС: NGC 6229, NGC 6779, NGC 5904, NGC 6254. Для первых двух объектов содержания химических элементов спектроскопическим методом были определены впервые. Эти ШС оказались, по нашим оценкам, примерно на 1 млрд лет моложе

признанных их аналогами в литературе NGC 5904 и NGC 6254. Для последних нами определено повышенное по сравнению с литературным содержание He ($Y = 0.30$). Скопления NGC 6229 и NGC 6779 показывают значения $Y = 0.23$ и $Y = 0.26$ соответственно, что ближе к значению первичного содержания гелия во Вселенной $Y = 0.25$ [43]. Содержание α -элементов у бедных металлами ($[Fe/H] \sim -1.6$) NGC 6229 и NGC 5904 оказалось повышенным ($[\alpha/Fe] = 0.28-0.35$), как и у большинства старых массивных шаровых скоплений Галактики, в процесс химического обогащения которых значительный вклад внесли массивные сверхновые II типа. Однако содержание α -элементов у скоплений нашего исследования с пониженной плотностью звезд в центре, NGC 6779 и NGC 6254, получилось довольно низким ($[\alpha/Fe] = 0.08, 0.025$) при их низкой металличности ($[Fe/H] = -1.9, -1.7$). Подобные значения $[\alpha/Fe]$ не являются типичными для низкометаллических скоплений Галактики. Поэтому предметом будущих исследований может послужить выявление зависимости химсостава ШС от их структуры и кинематических характеристик. Сравнение полученных содержаний с литературными для хорошо изученных ШС NGC 5904 и NGC 6254 показало, что наши измерения воспроизводят соответствующие средние литературные оценки для гигантов скоплений со средней точностью порядка 0.15 dex, за исключением C и N. Вероятно это происходит вследствие различия среднего химического состава атмосфер звезд всего скопления, который получен в данной работе, и химического состава атмосфер звезд высокой светимости, результаты исследований которых обычно приводятся в литературе. На поверхность таких звезд могут быть вынесены продукты переработки вещества в СНО-цикле, и их изучение не дает корректной информации о первичном химическом составе ШС.

Полученные нами по анализу спектроскопических данных значения $[Fe/H]$, Y и возраста позволяют оценить реальное соотношение между наблюдаемой диаграммой $C-M$ и соответствующей ей теоретической изохроной. В настоящее время при анализе свойств звездных населений внегалактических ШС нет возможности сочетать данные глубокой звездной фотометрии и спектроскопические методы оценки содержаний элементов и эволюционных параметров. Таким образом, наше исследование дает необходимый материал для понимания свойств ШС в далеких галактиках.

БЛАГОДАРНОСТИ

МЕШ благодарит за финансовую поддержку грант РФФИ 14-02-96501. ВВШ благодарит за

финансовую поддержку грант РФФИ 13-02-00351, а также горячо признателен за финансирование из средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Данное исследование было выполнено с использованием SAO/NASA ADS, а также базы данных SIMBAD, работающей при Страсбургском центре астрономических данных (CDS, Strasbourg, France). Мы благодарим анонимного рецензента за полезные советы, которые позволили улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. E. Harris, *Astron. J.* **112**, 1487 (1996).
2. T. V. Borkova and V. A. Marsakov, *Astronomy Reports* **44**, 665 (2000).
3. R. P. Schiavon, J. A. Rose, S. Courteau, and L. A. MacArthur, *Astrophys. J. Suppl.* **160**, 163 (2005).
4. J. Borissova, M. Catelan, N. Spassova, and A. V. Sweigart, *Astron. J.* **113**, 692 (1997).
5. J. Borissova, M. Catelan, F. R. Ferraro, et al., *Astron. and Astrophys.* **343**, 813 (1999).
6. J. Borissova, M. Catelan, and T. Valchev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **324**, 77 (2001).
7. M. Catelan, J. Borissova, A. V. Sweigart, and N. Spassova, *Astrophys. J.* **494**, 265 (1998).
8. N. Sanna, E. Dalessandro, B. Lanzoni, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422**, 171 (2012).
9. D. Hatzidimitriou, V. Antoniou, I. Papadakis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **348**, 1157 (2004).
10. A. Sarajedini, L.R. Bedin, B. Chaboyer, et al., *Astron. J.* **133**, 1658 (2007).
11. A. Dotter, A. Sarajedini, J. Anderson, et al., *Astron. J.* **708**, 698 (2010).
12. A. Dotter, B. Chaboyer, D. Jevremovic, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **178**, 89 (2008).
13. K. M. Cudworth and R. B. Hanson, *Astron. J.* **105**, 168 (1993).
14. P. C. C. Freire, A. Wolszczan, M. van den Berg, and J. W. T. Hessels, *Astrophys. J.* **679**, 1433 (2008).
15. G. Coppola, M. Dall'Ora, V. Ripepi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **416**, 1056 (2011).
16. A. C. Layden, A. Sarajedini, T. Hippel, and A. M. Cool, *Astron. J.* **632**, 266 (2005).
17. D. A. Vandenberg, K. Brogaard, R. Leaman, and L. Casagrande, *Astron. J.* **775**, 134 (2013).
18. G. Beccari, M. Pasquato, G. De Marchi, et al., *Astrophys. J.* **713**, 194 (2010).
19. E. Dalessandro, B. Lanzoni, G. Beccari, et al., *Astrophys. J.* **743**, 11 (2011).
20. D. A. Vandenberg, P. A. Bergbusch, and P. D. Dowler, *Astrophys. J. Suppl.* **162**, 375 (2006).

21. K. Banse, Ph. Crane, Ch. Ounnas, and D. Ponz, in *Proc. DECUS Europe Symposium, Zurich, Switzerland, 1983*, p. 87.
22. M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and E. Davoust, *Astronomy Reports* **57**, 410 (2013).
23. G. Bertelli, E. Nasi, L. Girardi, and P. Marigo, *Astron. and Astrophys.* **508**, 335 (2009).
24. G. Piotto, I. R. King, S. G. Djorgovski, et al., *Astron. and Astrophys.* **391**, 945 (2002).
25. M. Salaris, S. Cassisi, and A. Weiss, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114**, 375 (2002).
26. I. Jr. Iben, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **83**, 697 (1971).
27. I. Jr. Iben, *Astrophys. J. Suppl.* **76**, 55 (1991).
28. D. A. Vandenberg, M. Bolte, and P. B. Stetson, *Astron. J.* **100**, 445 (1990).
29. D. A. Vandenberg and P. R. Durrell, *Astron. J.* **99**, 221 (1990).
30. B. W. Carney and W. E. Harris, *Star Clusters*, Saas-Fee Advanced Course, № 28 (Springer, 2001).
31. J. C. Roediger, S. Courteau, G. Graves, and R. P. Schiavon, *Astrophys. J. Suppl.* **210**, 10 (2014).
32. N. L. D'Cruz, B. Dorman, R. T. Rood, and R. W. O'Connell, *Astrophys. J.* **466**, 359 (1996).
33. G. Chabrier, in *The Initial Mass Function 50 Years Later*, Ed. by E. Corbelli, F. Palla, and H. Zinnecker, *Astrophysics and Space Science Library*, № 327 (Springer, Dordrecht, 2005), p. 41.
34. F. Castelli and R. L. Kurucz, *IAU Symp.*, № 210, A20.
35. V. F. Suleimanov, *Astronomy Letters* **22**, 92 (1996).
36. N. N. Shimanskaya, I. F. Bikmaev, and V. V. Shimansky, *Astrophysical Bulletin* **66**, 332 (2011).
37. R. Gratton, C. Sneden, and E. Carretta, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **42**, 385 (2004).
38. C. Gallart, M. Zoccali, and A. Aparicio, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43**, 387 (2005).
39. B. J. Pritzl and K. A. Venn, *Astron. J.* **130**, 2140 (2005).
40. M. Samland, *Astrophys. J.* **496**, 155 (1998).
41. A. Alibes, J. Labay, and R. Canal, *Astron. and Astrophys.* **370**, 1103 (2001).
42. C. Kobayashi, H. Umeda, K. Nomoto, et al., *Astron. J.* **653**, 1145 (2006).
43. E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 18 (2011).

Chemical Abundances in the Globular Clusters NGC 6229 and NGC 6779

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

Long-slit medium-resolution spectra of the Galactic globular clusters (GCs) NGC 6229 and NGC 6779, obtained with the CARELEC spectrograph at the 1.93-m telescope of the Haute-Provence observatory, have been used to determine the age, helium abundance (Y), and metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]$ as well as the first estimate of the abundances of C, N, O, Mg, Ca, Ti, and Cr for these objects. We solved this task by comparing the observed spectra and the integrated synthetic spectra, calculated with the use of the stellar atmosphere models with the parameters preset for the stars from these clusters. The model mass estimates, T_{eff} , and $\log g$ were derived by comparing the observed “color–magnitude” diagrams and the theoretical isochrones. The summing-up of the synthetic blanketed stellar spectra was conducted according to the Chabrier mass function. To test the accuracy of the results, we estimated the chemical abundances, $[\text{Fe}/\text{H}]$, $\log t$, and Y for the NGC 5904 and NGC 6254 clusters, which, according to the literature, are considered to be the closest analogues of the two GCs of our study. Using the medium-resolution spectra from the library of Schiavon et al., we obtained for these two clusters a satisfactory agreement with the reported estimates for all the parameters within the errors. We derived the following cluster parameters. NGC 6229: $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.65$ dex, $t = 12.6$ Gyr, $Y = 0.26$, $[\alpha/\text{Fe}] = 0.28$ dex; NGC 6779: $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.9$ dex, $t = 12.6$ Gyr, $Y = 0.23$, $[\alpha/\text{Fe}] = 0.08$ dex; NGC 5904: $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.6$ dex, $t = 12.6$ Gyr, $Y = 0.30$, $[\alpha/\text{Fe}] = 0.35$ dex; NGC 6254: $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.52$ dex, $t = 11.2$ Gyr, $Y = 0.30$, $[\alpha/\text{Fe}] = 0.025$ dex. The value $[\alpha/\text{Fe}]$ denotes the average of the Ca and Mg abundances.

Keywords: *Galaxy: abundances—globular clusters: individual: NGC 6229, NGC 677*