

*На правах рукописи*

*УДК 524.47*

РЯБОВА МАРИНА ВЛАДИМИРОВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ И ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ  
ЭВОЛЮЦИИ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз – 2010

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
ст.н.с. **Щекинов Юрий Андреевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
**Вибе Дмитрий Зигфридович**  
кандидат физико-математических наук  
**Растегаев Денис Александрович**

Ведущая организация: **Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ**

**Защита диссертации состоится «15» октября 2010 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д 002.203.01 в Специальной Астрофизической Обсерватории РАН (369167, Карачаево-Черкесия, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз, САО РАН)**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Специальной Астрофизической Обсерватории РАН

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

Майорова Е.К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы**

Шаровые скопления (ШС) относятся к наиболее старому населению Галактики и несмотря на то, что их вклад в её полную массу пренебрежимо мал, их исследование занимает одно из центральных мест современной астрофизики. Это обусловлено как той ролью, которую они играют в понимании фундаментальной динамики самогравитирующих систем [1,2], так и тем, что они несут в себе информацию о самых начальных стадиях эволюции Галактики. Наблюдательные данные последних лет зачастую заставляют пересматривать прежние представления о происхождении и эволюции ШС.

Одним из ключевых в проблеме происхождения ШС является вопрос о химическом составе вещества газовых облаков, давших им начало. В течение длительного времени ШС традиционно рассматривались как простые звездные системы, в которых все звезды имеют практически одинаковый возраст и химический состав, происхождение которого описывалось в рамках сценария о предварительном обогащении [3]. Лишь в некоторых работах разрабатывался альтернативный сценарий самообогащения, в котором шаровые скопления образовывались из первичного вещества, не содержащего металлов, и все процессы обогащения проходили в них самих [4]. Одним из подходов для проверки этих сценариев и ответа на вопрос о составе вещества протошарового скопления может являться исследование соотношения масса–металличность таких звездных систем.

Бурное развитие наблюдательной астрономии в последние годы позволило обнаружить совершенно новые явления, нехарактерные для ШС в рамках традиционного понимания, когда они считались однородными объектами, население которых сформировалось практически

одномоментно, в едином акте звездообразования (ЗО). Вопреки привычному представлению об однородности химического состава звездных населений ШС, обнаружены большие вариации от звезды к звезде содержания легких элементов, причем зачастую связанные определенными зависимостями, например, такими как антикорреляция O и Na, Mg и Al, C и N [5-13]. Кроме того, диаграммы «цвет–звездная величина» для многих ШС демонстрируют множественность звездных популяций в области главной последовательности или субгигантов [14-23]. В конечном счете, наблюдательные данные заставили взглянуть на ШС по-новому, а именно, принять концепцию протяженной во времени последовательности локальных эпизодов звездообразования взамен схемы единократного акта, охватывающего всё скопление [13].

Особый интерес представляет исследование диаграмм «цвет–звездная величина» звездных систем, которые по своей сути отображают не только современное состояние системы, но и содержат в себе информацию о процессах, происходивших в ней, начиная с момента формирования. В последние годы стало возможным наблюдение отдельных маломассивных звезд в ШС, являющихся «хранителями» тех условий, которые были в системе на момент их рождения. Поэтому теоретическое моделирование фотометрической эволюции ШС и сравнение характеристик, полученных из диаграмм «цвет–звездная величина», становится актуальной задачей, решение которой позволит прояснить картину ранней эволюции этих звездных систем.

Разумеется, понимание всех аспектов эволюции ШС: истории звездообразования, обогащения химическими элементами внутри ШС, обмена веществом между скоплениями и окружающим их межзвездным газом остается все еще далеко не полным. Вместе с тем, существующие представления о ШС достаточны для построения правдоподобных численных моделей химической и фотометрической эволюции, которые

позволили бы правильно интерпретировать наблюдаемые особенности химического состава, множественности звездных популяций на диаграммах «цвет–звездная величина».

### **Цель работы**

Работа направлена на понимание основных моментов эволюции ШС на основе математического моделирования их химических и фотометрических свойств. С помощью компьютерного моделирования и аналитических методов планируется развить существующие представления и гипотезы об их эволюции и построить количественно согласованный сценарий эволюции элементного состава ШС.

### **Научная новизна**

Основные результаты, содержащиеся в диссертации, получены впервые:

- Предложено объяснение особенностей химического состава ШС в рамках предположения о временной зависимости начальной функции масс (НФМ) звезд.
- Приведены аргументы в пользу того, что переход звездообразования от режима с НФМ, первоначально смещенной в сторону массивных звезд, к режиму с нормальной НФМ, связан с радиационным охлаждением вещества протошарового скопления в результате обогащения его тяжелыми элементами.
- Получен общий вид зависимости металличности скопления от массы: при шмидтовском законе ЗО и быстром перемешивании межзвездного вещества на стадии вспышек сверхновых эта зависимость имеет вид  $Z \sim M^{-1}$ .
- Показано, что наличие нескольких точек поворота на диаграммах «цвет–звездная величина» естественным образом объясняется в

моделях с самообогащением, требующих вариации начальной функции масс звезд от первоначально смещенной в сторону массивных звезд к нормальной.

- Показано, что отсутствие множественных точек поворота не обязательно означает внешнее (предварительное) обогащение вещества шаровых скоплений металлами и может быть совместимо со сценарием самообогащения.
- Воспроизведены характерные наблюдательные особенности функции распределения звезд по  $[O/Na]$  для скоплений NGC 2808 и NGC 6752, в рамках предложенного эволюционного сценария с вероятностным описанием процессов перемешивания.

#### **Научная и практическая значимость работы**

- Основные научные результаты диссертационной работы имеют теоретическую ценность и представляют собой вклад в исследование ряда фундаментальных проблем эволюции ШС.
- Разработан численный код и апробирован пакет программ для численного моделирования химической и фотометрической эволюции звездных систем с высоким временным разрешением. Код может быть использован для решения широкого круга эволюционных задач, связанных, например, с исследованием удаленных галактик. В частности, в настоящее время код используется в САО РАН в задачах изучения свойств родительских галактик гамма-всплесков.
- Полученная связь между массой и металличностью для ШС, согласующаяся с наблюдаемой для ШС старого гало, говорит в пользу гипотезы о самообогащении и может служить основанием для ее дальнейшего развития.

- Показано, что наблюдаемая немонотонная зависимость масса–металличность для маломассивных карликовых галактик может быть связана с изменением режима обмена веществом между галактикой и межгалактической средой при переходе от систем со слабым гравитационным потенциалом к системам с сильным потенциалом.
- Показано, что обогащение металлами скоплений  $\omega$  Cen, NGC 1851 могло осуществляться внутренними процессами.
- Показано, что особенности распределения элементного состава, в частности, антикорреляция между кислородом и натрием, несет в себе информацию не только о характере звездообразования в ШС, но и об эффективности перемешивания вещества в них.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. В моделях с самообогащением, в которых шаровое скопление начинает свою эволюцию из состояния с первичным химическим составом, начальная функция масс звезд эволюционирует от первоначально смещенной в сторону массивных звезд к нормальной вследствие радиационного остывания вещества протошарового скопления в результате обогащения его тяжелыми элементами. При этом с увеличением массы скопления его металличность уменьшается, что согласуется с наблюдаемой зависимостью для галактических шаровых скоплений старого гало [24]. Полученная зависимость определяется законом звездообразования.
2. Двухпиковые или многопиковые распределения звезд на главной последовательности по цвету, наблюдаемые, например, в  $\omega$  Cen, NGC 2808, могут являться следствием непрерывного (шмидтовского) закона звездообразования и не требуют разнесенных во времени вспышек рождения звезд.

3. Наличие двух или нескольких точек поворота на диаграммах «цвет–звездная величина» некоторых шаровых скоплений ( $\omega$  Cen, NGC 1851) естественным образом объясняется в моделях с самообогащением, в которых начальная функция масс эволюционирует от первоначально смещенной в сторону массивных звезд к нормальной.
4. Функция распределения звезд по [O/Na] в шаровых скоплениях NGC 2808, NGC 6752 отражает неполное перемешивание вещества звездного ветра и окружающего межзвездного газа, а также свидетельствует о том, что популяция звезд, демонстрирующая антикорреляцию содержания O и Na, рождается в окрестности отдельных родительских звезд первого поколения, обогащающих газ аномальным химическим составом.

### **Публикации по теме диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 работах, в том числе в 6 статьях в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК.

1. Касьянова М.В., Щекинов Ю.А. О химической эволюции шаровых скоплений // Астрон. Журн. 2005. Т. 82. № 11. С. 967–975.
2. Касьянова М.В., Щекинов Ю.А. Цветовые функции звездных систем // Астрофизика. 2006. Т. 49. № 1. С. 139–150.
3. Рябова М.В., Щекинов Ю.А. Множественность точек поворота в шаровых скоплениях // Астрон. Журн. 2008. Т. 85. № 5. С. 398–408.
4. Рябова М.В., Щекинов Ю.А. О распределении [O/Na] в шаровых скоплениях // Астрон. Журн. 2009. Т.86. № 11. С. 1069–1078.
5. Рябова М.В., Щекинов Ю.А. Зависимость металличности от массы для карликовых сфероидальных галактик // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2009. № 5. С. 52–55.

6. Рябова М.В., Щекинов Ю.А. Стимулированное звездообразование в шаровых скоплениях // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2010. № 1. С. 48–51.
7. Касьянова М.В. Химическая эволюция шаровых скоплений // Физика космоса. – Труды 33-й Международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, февраль 2004 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2004. С. 200.
8. Касьянова М.В. Моделирование химической эволюции шаровых скоплений // «Молодежь XXI века – будущее Российской науки» (тезисы докладов II Межрегиональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 21–22 мая 2004 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «ЦВВР», 2004. С. 54–55.
9. Касьянова М.В. Моделирование хемодинамической эволюции шаровых скоплений // Труды государственного астрономического института им. П.К. Штернберга, том LXXV. Тезисы докладов на Всероссийской астрономической конференции ВАК-2004 «Горизонты Вселенной», МГУ, ГАИШ, 2004. С. 121.
10. Касьянова М.В. Бимодальное звездообразование в шаровых скоплениях // Тезисы докладов 11-ой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых, Екатеринбург, 2005 г. С. 387.
11. Касьянова М.В. Моделирование химической и фотометрической эволюции шаровых скоплений // «Молодежь XXI века – будущее Российской науки» (тезисы докладов III межрегиональной научно-практической конференции, 12–13 мая 2005 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «ЦВВР», 2005. С. 198–199.

12. Касьянова М.В. Химическая и фотометрическая эволюция шаровых скоплений // Физика космоса. – Труды 34-й Международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, февраль 2005 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2005. С. 227.
13. Рябова М.В., Щекинов Ю.А. Множественность точек поворота на цветовых диаграммах шаровых скоплений // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. – Сборник трудов конференции, Казань, 17–22 сентября. – Казань: Изд-во Казанского государственного ун-та, 2007. С. 361.
14. Рябова М.В., Щекинов Ю.А. Соотношение масса – металличность для карликовых сфероидальных галактик // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. – Сборник трудов конференции, Казань, 17–22 сентября. – Казань: Изд-во Казанского государственного ун-та, 2007. С. 396–397.
15. Ryabova M.V., Shchekinov Yu.A. The Modelling of the Mass-Metallicity Relation for the Local Group Dwarf Galaxies // Odessa Astronomical Publications. 2008. V. 21. P. 100–101.
16. Ryabova M.V., Shchekinov Yu.A., The Sequential Star Formation in Globular Clusters // Odessa Astronomical Publications. 2008. V. 21. P. 102–103.
17. Рябова М.В. Моделирование соотношения масса – металличность для карликовых сфероидальных галактик // Физика космоса. – Труды 38-й Международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, февраль 2009 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2009. С. 330.

#### **Личный вклад автора**

Постановка задач осуществлялась автором совместно с научным руководителем Ю. А. Щекиновым. При этом автору принадлежат анализ

наблюдательных данных, проведение теоретических исследований, разработка алгоритмов, написание и отладка численных кодов, численное моделирование и анализ результатов расчетов. Написание статей выполнялось автором совместно с научным руководителем в равных долях.

### **Апробация результатов**

Результаты исследования были представлены

– на астрофизических семинарах кафедры физики космоса Южного федерального университета, САО РАН и Астрономического института Рурского университета (Бохум, Германия).

– на всероссийских конференциях:

1. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК–2004, ВАК–2007) (2004, Москва; 2007, Казань);
2. XXXIV, XXXV и XXXVIII зимние студенческие конференции «Физика космоса» (2004, 2005, 2009 гг., Екатеринбург, Астрономическая обсерватория УрГУ);
3. Всероссийская научной конференции студентов физиков и молодых ученых (2005., Екатеринбург);
4. Всероссийская XXIII конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии» (2006., ПРАО ФИАН);
5. Всероссийская астрономическая школа «Физика галактик» (2007., п. Нижний Архыз, САО РАН);
6. II и III Межрегиональные научно-практические конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь XXI века – будущее российской науки» (2004, 2005 гг., Ростов-на-Дону);
7. Всероссийская научная конференция «Химическая и динамическая эволюция галактик» (2009, Ростов-на-Дону).

– на международных конференциях:

1. «Dynamics of galaxies» (2007, Санкт-Петербург);
2. «Химическая и динамическая эволюция звезд и галактик» (2008 г., Украина, Одесса);
3. «Nearby Dwarfs Galaxies» (2009, п. Нижний Архыз, САО РАН).

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 133 наименований, 33 рисунков. Общий объем диссертации 143 страницы.

### **Содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, дан краткий исторический обзор проблематики, сформулированы положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание глав.

В первой главе сформулирована система уравнений для моделирования химической эволюции звездных систем с элементами моделирования динамических свойств в рамках модели, описанной впервые в работе [25] и развитой впоследствии в работе [26]. Описываемый подход соответствует однозонной химико-динамической модели, которая на качественном уровне позволяет понять последовательность событий, определяющих химическую эволюцию звездных систем.

Предложен новый подход к пониманию эволюционных процессов, происходящих на ранних стадиях эволюции ШС в рамках сценария о самообогащении, когда скопление начинает свою эволюцию из газа с первичным химическим составом. Показано, что звездообразование в них должно было включать два основных эпизода: на начальном этапе звездообразование характеризовалось НФМ, смещенной в сторону

массивных звезд, что находится в согласии с современными представлениями о том, что звезды, рождающиеся из вещества с первичным химическим составом являются более массивными; на следующем этапе НФМ должна была трансформироваться к нормальному виду с подавляющей долей маломассивных звезд. При этом переход звездообразования к режиму с нормальной НФМ связан с радиационным охлаждением вещества протошарового скопления в результате обогащения его тяжелыми элементами. Проведенный численный расчет показывает, что, когда происходит данный переход, концентрация металлов в скоплении становится равной  $Z \approx 0.02 Z_{\odot}$ , что близко к наблюдаемому значению.

В рамках предложенного эволюционного сценария получена зависимость масса–металличность для шаровых скоплений.

В рамках однозонной модели, включающей учет темной материи, исследовалось соотношение масса–металличность также для карликовых сфероидальных галактик Местной группы. По результатам исследования можно сделать вывод, что благодаря истечению вещества соотношение между массой и металличностью для этих галактик может быть немонотонным, что находится в согласии с наблюдениями.

Во второй главе исследовано влияние вариации НФМ на структуру диаграмм «светимость–эффективная температура» в области маломассивных звезд. Показано, что звезды малых масс концентрируются вблизи минимальной и максимальной температур при заданной светимости и показывают недостаток в промежуточной области. Избежать такого двухпикового распределения звезд удастся в открытых моделях с выбросом избыточных металлов в окружающую среду. Функции распределения звезд по эффективной температуре на диаграмме чувствительны к истории звездообразования в системе и к возможным вариациям во времени НФМ. В главе предложена возможность

наблюдательного определения этих вариаций при помощи такой количественной оценки как асимметрия распределения звезд вдоль среза при некотором фиксированном значении светимости.

В третьей главе приводятся результаты моделирования тонкой структуры диаграмм «цвет–звездная величина» шаровых скоплений и описывается их зависимость от сценария обогащения.

Продемонстрирована возможность получения нескольких точек поворота в рамках предложенной в главе 1 самосогласованной модели химической эволюции. Приводится пример перехода от диаграммы с двумя точками поворота к диаграмме с тремя точками поворота, который получен только увеличением на порядок одного из параметров модели, без необходимости задания «руками» последовательности нескольких вспышек ЗО. Наличие нескольких точек поворота в исследуемой модели является следствием естественной эволюции звездной системы и не требует более сильных предположений о характере звездообразования.

Для анализа главной последовательности были рассчитаны распределения звезд по цвету вдоль «среза» при некотором фиксированном значении звездной величины. Показано, что если в действительности на диаграмме выделяется на несколько главных последовательностей, то в наблюдениях такое разделение проявляется далеко не всегда из-за ошибок наблюдения, сравнимых с различием цвета между отдельными ветвями (или превышающих его).

Для модели эволюции ШС с предварительным обогащением на диаграмме «цвет–звездная величина» множественные точки поворота отсутствуют. Однако получить подобную диаграмму можно и в модели с самообогащением в том случае, если параметры модели ЗО таковы, что расстояние (по  $B-V$ ) между главными последовательностями окажется меньше величины ошибки наблюдений. В этом случае различить две популяции на экспериментальных диаграммах практически невозможно.

Таким образом, отсутствие множественных точек поворота на диаграмме «цвет–звездная величина» не означает с необходимостью, что вещество соответствующего шарового скопления было предварительно обогащено тяжелыми элементами – разделение, возникающее в моделях с самообогащением, может оказаться меньше ошибки определения цветов.

Результаты моделирования могут являться аргументом в пользу того, что обогащение металлами шаровых скоплений с множественными точками поворота (таких как  $\omega$  Cen, NGC 1851) могло осуществляться внутренними процессами;

В четвертой главе анализируется возможность построения такой эволюционной схемы, которая позволила бы воспроизвести наблюдаемую в ШС антикорреляцию между Na и O.

Эволюция звездной системы рассматривается в рамках предположения о том, что протооблако ШС вместе с веществом всей Галактики было уже предварительно обогащено металлами предшествующим звездным населением (населением III), а внутри скопления в процессе звездной эволюции происходило последующее обогащение лишь легкими элементами вплоть до Al.

Предложен эволюционный сценарий, позволяющий воспроизвести наблюдаемые функции распределения звезд по [O/Na] для скоплений NGC 2808 и NGC 6752. В качестве источника химических аномалий рассматривается медленный ветер от массивных вращающихся звезд в соответствии с [27]. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что особенности химического состава шаровых скоплений могут быть объяснены в рамках модели с ограниченным перемешиванием вещества звездного ветра и окружающего межзвездного газа, т. е. звезды второго поколения рождаются в окрестности отдельных массивных звезд первого поколения из неоднородно распределенного вещества, выбрасываемого с их поверхности.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кинг А.Р. Введение в классическую звездную динамику: Учебное пособие. Пер. с англ. В.Г. Сурдина и А.С. Расторгуева. – М.: Едиториал УРСС, 2002. 288 с.
- [2] Сурдин В.Г. Приливное разрушение шаровых скоплений в Галактике // *Астрон. журн.* 1979. Т. 56. С. 1149.
- [3] Harris W.E., Pudritz R.E. Supergiant molecular clouds and the formation of globular cluster systems // *Astrophys. J.* 1994. V. 429. P. 177.
- [4] Parmentier G., Jehin E., Magain P., Neuforge C., Noels A., Thoul A.A. The self-enrichment of galactic halo globular clusters. A clue to their formation? // *Astron. and Astrophys.* 1999. V. 352. P. 138.
- [5] Kraft R.P., Sneden C., Langer G.E., Shetrone M.D. Oxygen abundances in Halo giants. IV - The oxygen-sodium anticorrelation in a sample of 22 bright giants in M13 // *Astrophys. J.* 1993. V. 106. P. 1490.
- [6] Grundahl F., Briley M., Nissen P.E., Feltzing S. Abundances of RGB stars in NGC 6752 // *Astron. and Astrophys.* 2002. V. 385. P. L14.
- [7] Cohen J.G., Briley M.M., Stetson P.B. Carbon and Nitrogen Abundances in Stars at the Base of the Red Giant Branch in M5 // *Astrophys. J.* 2002. V. 123. P. 2525.
- [8] Yong D., Grundahl F., Lambert D.L., Nissen P.E., Shetrone M.D. Mg isotopic ratios in giant stars of the globular cluster NGC 6752 // *Astron. and Astrophys.* 2003. V. 402. P. 985.
- [9] Sneden C., Kraft R.P., Guhathakurta P., Peterson R.C., Fulbright J.P. The Chemical Composition Contrast between M3 and M13 Revisited: New Abundances for 28 Giant Stars in M3 // *Astrophys. J.* 2004. V. 127. P. 2162.
- [10] Yong D., Grundahl F., Nissen P.E., Jensen H.R., Lambert D.L. Abundances in giant stars of the globular cluster NGC 6752 // *Astron. and Astrophys.* 2005. V. 438. P. 875.

- [11] Carretta E., Bragaglia A., Gratton R.G., Leone F., Recio-Blanco A., Lucatello S. Na-O anticorrelation and HB. I. The Na-O anticorrelation in NGC 2808 // *Astron. and Astrophys.* 2006. V. 450. P. 523.
- [12] Gratton R.G., et al Na-O anticorrelation and horizontal branches. V. The Na-O anticorrelation in NGC 6441 from Giraffe spectra // *Astron. and Astrophys.* 2007. V. 464. P. 953.
- [13] Marino A. F., Villanova S., Piotto G., Milone A. P., Momany Y., Bedin L.R., Medling A.M. Spectroscopic and photometric evidence of two stellar populations in the Galactic globular cluster NGC 6121 (M 4) // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 490. P. 625.
- [14] Anderson J. 2002, in *ASP Conf. Ser. Vol. 265,  $\omega$  Centauri: A Unique Window into Astrophysics*, eds F. van Leeuwen, J.D. Hughes, G. Piotto. (San Francisco: ASP), P. 87.
- [15] Bedin L.R., Piotto G., Anderson J., Cassisi S., King I.R., Momany Y., Carraro G.  $\omega$  Centauri: The Population Puzzle Goes Deeper // *Astrophys. J.* 2004. V. 605. P. L125.
- [16] Villanova S., et al. The Multiplicity of the Subgiant Branch of  $\omega$  Centauri: Evidence for Prolonged Star Formation // *Astrophys. J.* 2007. V. 663. P. 296.
- [17] Piotto G., et al. A Triple Main Sequence in the Globular Cluster NGC 2808 // *Astrophys. J. (Letters)* 2007. V. 661. P. L53.
- [18] Milone A.P. et al. The ACS Survey of Galactic Globular Clusters. III. The Double Subgiant Branch of NGC 1851 // *Astrophys. J.* 2008. V. 673. P. 241–250.
- [19] Busso G., et al. The peculiar horizontal branch morphology of the Galactic globular clusters NGC 6388 and NGC 6441: new insights from UV observations // *Astron. and Astrophys.* 2007. V. 474. P. 105.

- [20] Caloi V., D'Antona F. NGC 6441: another indication of very high helium content in globular cluster stars // *Astron. and Astrophys.* 2007. V. 463 P. 949.
- [21] Siegel M.H., et al. The ACS Survey of Galactic Globular Clusters: M54 and Young Populations in the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy // *Astrophys. J. (Letters)*. 2007. V. 667. P. L53.
- [22] Mackey A.D., Broby Nielsen P. A double main-sequence turn-off in the rich star cluster NGC 1846 in the Large Magellanic Cloud // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 2007. V. 379. P. 151.
- [23] Prantzos N., Charbonnel C. On the self-enrichment scenario of galactic globular clusters: constraints on the IMF // *Astron. and Astrophys.* 2006. V. 458. P. 135–149.
- [24] Parmentier G., Gilmore G. The self-enrichment of galactic halo globular clusters. The mass-metallicity relation // *Astron. and Astrophys.* 2001. V. 378. P. 97–101.
- [25] Firmani C., Tutukov A. Evolutionary models for disk galaxies // *Astron. and Astrophys.* 1992. V. 264. P. 37–48.
- [26] Вибе Д.З., Тутуков А.В., Шустов Б.М. Об эволюции темпа звездообразования в дисковых галактиках // *Астрон. журн.* 1998. Т. 75. С. 3–13.
- [27] Decressin T., Meynet G., Charbonnel C., et al. Fast rotating massive stars and the origin of the abundance patterns in galactic globular clusters // *Astron. and Astrophys.* 2007. V. 464. P. 1029–1044.