ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗВЕЗД ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

Т. В. Мишенина

НИИ Астрономическая обсерватория при Одесском национальном университете
65014 Одесса, Парк им. Т. Г. Шевченко
e-mail: tamar@deneb1.odessa.ua

Кратко изложена история спектроскопических исследований шаровых скоплений (ШС). Представлены методы определения металличности и химического состава ШС. Дано современное состояние описания содержания элементов в атмосферах звезд ШС.

ВВЕДЕНИЕ

История исследования шаровых скоплений (ШС) начинается в телескопическую эпоху, когда 26 августа 1665 г. Абрахам Ил обнаружил в созвездии Стрельца диффузный объект, впоследствии получивший название M 22, а спустя несколько лет Эдмунд Галлей обратил внимание на странный вид звезды ω Cen (1677 г.) и диффузное пятнышко в созвездии Геркулеса, впоследствии M 13 (1714 г.). Прошло более ста лет, прежде чем французский астроном Шарль Месье в 1764 г. начал систематические поиски туманных объектов, которые не меняли своего положения среди звезд. В 1771 г. он опубликовал свой знаменитый Каталог, куда вошли подобные объекты (103 объекта, третье издание [83]). К концу 18 столетия Вильям Гершель с более мощным телескопом увидел все известные к тому времени (33) шаровые скопления, разрешенными на звезды, и открыл еще 37. Именно он предложил термин шаровое скопление (globular cluster). Данлоп (1828 г.) пополнил список ШС по наблюдениям в Южном полушарии. К настоящему времени оценка их полного количества в Галактике порядка 180 $\pm$ 20. Шаровые скопления Галактики содержат 10^4–10^6 звезд, их диаметры составляют 20–60 пк, массы – 10^4–$10^6\,M_\odot$ [5].

ПЕРВЫЕ СПЕКТРЫ ЗВЕЗД И ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

Уильям Хёггинс (1824–1910 гг.) одним из первых оценил значение открытого Г. Р. Кирхгофом и Р. В. Бунзеном в 1859 г. метода спектрального анализа для изучения небесных тел. Первые спектры планетарных туманностей и звездных скоплений были получены Хеггинсом в 1864 г. [58] спустя почти сто лет после выхода каталога Месье. Уильям Хёггинс установил сходство спектров многих звёзд со спектром Солнца, исследуя область длин волн от $\lambda\,4870$ до $\lambda\,3300$ Å [57]. Хёггинс впервые получил и исследовал спектры газовых туманностей, состоящие из отдельных линий излучения. Наблюдения он проводил на 20-см телескопе – рефракторе со спектроскопом собственной конструкции. Практически в одно и то же время с Хеггинсом, в 1863–1868 гг. итальянский астрофизик Анджело Сёкки (1818–1878 гг.) изучил спектры 4 тыс. звёзд и создал первую классификацию звёздных спектров, разделив их на четыре класса. Американский любитель астрономии Генри Дрэпер (1837–1882 гг.) в 1872 г. получил первую фотографию спектра звезды Веги, а в дальнейшем – спектры ярких звёзд, Луны, планет, комет и туманностей.

Спектральные исследования ШС проводились как по их интегральным (составным) спектрам, так и по спектрам отдельных звезд. Анализ составных спектров ШС впервые был проведен Фатом [45]. Сначала (1911 г.) на 36″ рефлекторе Кроссли Ликской обсерватории (Маунт-Гамилтон), по спектрам с дисперсией 430 Å/мм, длительность экспозиции равнялась 13–16 часам. Затем в работах, выполненных на 60″ рефлекторе обсерватории Маунт-Вилсон, Фат показал [46], что в спектрах скоплений M 53, M 13, NGC 6229, M 92, M 22, NGC 6934, M 15 доминируют линии водорода серии Бальмера и H и K Ca II, спектры всех скоплений аппроксимируются спектром спектрального класса F. Звезды шаровых скоплений, меняющие свой блеск, "анормальные", прежде всего, обратили на себя внимание астрономов. Барнард [6] и Балей [97] были первыми открывателями большого числа переменных звезд в ШС. Это оказались короткопериодические пульсирующие переменные звезды типа RR Lyr. Они сыграли выдающуюся роль в исследовании Галактики. В 1918 г. Харлоу Шепли, приняв правильное толкование асимметрии распределения ШС относительно Солнца и использовав звезды типа RR Lyr как индикаторы расстояния ШС, определил место галактического центра и положение Солнечной системы в Галактике (50 ШС, 10 кпк) [113].

ПЕРВЫЕ СПЕКТРЫ ЗВЕЗД ШС И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И МЕТАЛЛИЧНОСТИ ШС

Первые спектры звезд в ШС были получены в 1913–1914 гг. Пизом [96] для звезд скопления M 13 на спектрографе с узкой щелью, установленном на 60″ рефлекторе обсерватории Маунт-Вилсон в области длин волн λ 3900–5000 Å. Экспозиции были еще более длительными, чем при получении спектров скоплений, и составляли 21–22 часа. Спектры 19 звезд скопления M 13 укладывались в довольно правильную последовательность спектральных классов Sp от A0 до G0. Первые определения лучевой скорости звезд ШС выполнены Слифером [118] в 1918 г. Бертил Линдблад в 1922 г. первым отметил ослабление линий полос молекулы циана CN λ 4215 в спектрах звезд ШС (наблюдения на обсерватории Маунт-Вилсон, 60″ рефлектор) [78]. В дальнейшем эта особенность спектров сыграла важную роль в исследовании химического состава ШС. Он также заметил, что звезды ШС принадлежат к той же группе галактического населения, что и высокоскоростные звезды. В 1946 г. Майал [80] по спектрам с дисперсией 430 Å/мм (36″ рефлектор Кроссли) обнаружил различие составных спектров ШС в пределах спектральных классов A5–G5 и обратил внимание, что ослабление линии K Ca II и линии стронция Sr II напоминает спектры звезд с ослабленными линиями в солнечной окрестности. Затем в 1947 г. Поппер [103] по спектрам, полученным на Кассегреновском спектрографе и камере Шмидта обсерватории Мак-Доналд, подтвердил ослабление поглощения в синей области спектра в полосе CN у звезд спектральных классов G и K скоплений M 3 и M 13. Обнаружение Баумом [7] в 1952 году экстремально слабых линий металлов в скоплениях M 92 и M 3 и отличия спектров звезд ШС и звезд поля солнечной металличности можно считать первым серьезным указанием на пониженное содержание металлов в звездах ШС, полученное по спектрам с умеренной дисперсией 38 Å/мм (200″ телескоп обсерватории Маунт-Паломар).

Эти первые исследования выявили схожесть спектров звезд ШС и звезд поля с ослабленными линиями в спектрах и высокими пространственными скоростями, т.е. со звездами с дефицитом металлов. Дальнейшие количественные оценки химического состава звезд ШС и звезд поля с дефицитом металлов также сравнивались и сопоставлялись между собой. Первой работой по количественной оценке содержания элементов в звездах с дефицитом металлов можно считать работу Мартина и Барбары Шварцшильдов [111]. Наблюдения для карликов спектрального класса F получены на 100″ телескопе обсерватории Маунт-Вилсон, дисперсия 10 Å/мм, диапазон длин волн λ 4220–4680 Å. Определено, что отношение водорода к железу в 2 раза выше в высокоскоростных карликах по отношению к содержанию в низкоскоростных карликах. На этом же телескопе Чемберлен и Аллер [36] для звезд-субкарликов спектрального класса A обнаружили дефицит содержания кальция и железа. И только в 1956 г. Маргерит и Джефри Бербиджи [24] определили содержание ряда элементов Mg, Al, Ca, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Sr, Y, Zr, Ba у звезд с дефицитом металлов. В 1954 г. было показано по спектрам, полученным на Паломарском телескопе, что звезды спектрального класса B скопления NGC 1647 имеют спектры, отличающиеся от спектров своих аналогов в поле [50]. Отмечено, что линии He I λ 4121, 4144 Å слабее у звезд ШС, а линии Si II λ 4128, 4132 Å усилены по сравнению со спектром звезды стандарта χ Hya. Возможно, это первое упоминание о проблемах химического состава звезд горизонтальной ветви ГВ ШС. В 1959 г. Хельфером, Валлерстейном и Гринстейном [55] было выполнено первое определение содержания большого ряда элементов: Na, Mg, Ca, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Sr, Y, Zr, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu в атмосферах звезд ШС, это были K-гиганты шаровых скоплений M 13 и M 92. Спектры получены на Паломарском куде-спектрографе в области длин волн 4000–4900 Å с дисперсией 17.8 и 9 Å/мм. Температура возбуждения определялась по отношению интенсивностей пар линий железа Fe I с различающимися потенциалами возбуждения нижнего уровня. Для определения содержаний элементов использовались кривые роста, представляющие собой зависимость эквивалентной ширины EW линии от количества атомов, участвующих в ее образовании (для сравнения использовались теоретические кривые роста Врубеля [141]).

Другие методы определения металличности ШС.
Исследуя субкарлики и звезды-карлики спектрального класса F по фотометрическим наблюдениям (система Моргана–Джонсона) на 13″ рефракторе обсерватории Мак-Доналд, Нэнси Роман [105] обнаружила, что ряд звезд-субкарликов поля по своей кинематике напоминают кинематику ШС и показывают заметный избыток в УФ. Тот факт, что в F-, G-, K-звездах поглощение в линиях элементов железного пика определяет вид ультрафиолетовой и синей части спектра (λ 3000–5000 Å), определил развитие методов и использование многоцветной фотометрии и распределений энергии в спектрах отдельных звезд ШС для определения металличности и химического состава скоплений и звезд в скоплениях. Так, например, как было показано Сэндиджем [107, 108], в фотометрической системе Моргана–Джонсона вертикальный сдвиг в цветах $\delta\ (U-B)$ на $(B-V)\ =\ 0.6$ коррелирует с металличностью субкарликов $[\mathrm{Fe/H}]\ =\ \lg \mathrm{A(Fe)}\ -\ \lg \mathrm{A(Fe)}_{\odot}$, полученной ранее методом кривых

роста, где $\lg A(Fe)$ – содержание железа в звезде, а $\lg A(Fe)_\odot$ – содержание железа на Солнце в шкале содержания водорода $\lg A(H) = 12$. Использование шестицветной фотометрии, системы Стебинса–Уитфорда [74] и системы DDO [81] позволило исследовать содержание элементов группы CNO независимо от содержания элементов железного пика. Фотометрическая система C, M, T_1, T_2 была предложена Валлерстейном и Хельфером [139] специально для исследования K-гигантов и состояла из специально выбранных участков спектра, чувствительных к содержанию CNO и поглощению в линиях металлов. Чувствительность полос окиси титана в области 7 000 Å использовалась для высокометалличных ШС [88], вильнюсская фотометрическая система [144] – для интегральной фотометрии шаровых скоплений. Метод Сирля–Цина [112] использует распределения энергии в узких участках спектра (160 Å) и чувствительность УФ-области спектра к поглощению в линиях металлов, но не зависит от межзвездного покраснения в отличие от фотометрических методов. В этой работе получены новые фундаментальные данные формирования и эволюции Галактики, интерпретируемые как иерархическое слипание протофрагментов в отличие от модели Эггена и др. [44], описывающей формирование Галактики как однородный коллапс. Особо следует упомянуть метод Престона [104], или δ метод, где δ S = 10 [Sp(H) – Sp(Ca II)] – различие в определении спектрального класса Sp по линиям водорода и линиям кальция. Метод предложен Престоном для звезд типа RR Lyr с использованием спектров умеренного (10–20 Å) разрешения. Метод основан на том, что в диапазоне спектральных классов A3–F5 и в соответствующем им диапазоне температур непрозрачность в континууме определяется поглощением на H^- и связано-свободными и свободно-свободными переходами водорода и зависит от содержания водорода, а интенсивность линий водорода зависит от температуры и не зависит от содержания металлов, в то время как интенсивность линий кальция зависит и от температуры, и от содержания кальция. На основе этого метода выполнено определение металличности большого числа звезд типа RR Lyr для 17 ШС [25]. Все перечисленные методы не являются прямыми методами определения металличности и требуют калибровок по спектрам высокого разрешения.

Особенности морфологии диаграммы цвет C – звездная величина M_V также были использованы для определения содержания металлов. Как показали исследования, увеличение металличности [Fe/H] или массовой доли тяжелых элементов Z приводит к смещению ветви гигантов (ВГ) в красную сторону и искажению горизонтальной ветви (ГВ). Однако на морфологию диаграммы C–M_V влияют также содержание гелия и возраст скопления. И, тем не менее, был предложен ряд индикаторов, использующих особенности морфологии диаграммы, для определения металличности. Это: δV – высота ВГ над ГВ на $B-V = 1.40$ [109]; не покрасневшее значение $(B-V)$ ВГ, соответствующее светимости ГВ [110]; наклон ВГ относительно точки пересечения ГВ и ВГ [47]. Первые два зависят от покраснения, последний – не зависит, но теряет чувствительность при $[Fe/H] < -1.5$.

Подводя итог классической эпохи исследования ШС, остановимся на работе Цина и Веста [145]. В ней определена металличность 121 ШС Галактики и 3 ШС в Малом Магеллановом Облаке. Для 60 шаровых скоплений использовались спектрограммы с дисперсией 121 Å/мм в диапазоне λ 3600–5700 Å, полученные на 1-м Йельском рефлекторе в Сьерро Тололо. Измеренные псевдоэквивалентные ширины линий H, Ca II K, G-полосы и линий Mg I b, а также независящий от покраснения фотометрический индекс Q_{39} (мера блокировки линий в области 3820–4100 Å) и новые температурные калибровки Коэн [37, 38] использовались для определения металличности. Авторами было установлено, что металличность ШС [Fe/H] лежит в диапазоне от $+0.24$ до -2.58. Определения для металличных ШС ([Fe/H] $\sim +0.2$), находящихся по направлению к центру Галактики, взяты из работы Малкана [79]. По определениям авторов самыми металличными скоплениями являются скопления NGC 5927, 6553 (с металличностью [Fe/H] ~ -0.3), самое низкометалличное скопление NGC 5053, его [Fe/H] $= -2.58$. Сравнение определений металличности скоплений с использованием различных методов показало заметный разброс в [Fe/H], он равен ± 0.5 dex.

СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД ШС

Существенной составляющей определения химического состава звезд по высокодисперсионным спектрам является знание параметров атмосфер звезд, прежде всего эффективной температуры $T_{эф}$ и ускорения силы тяжести на поверхности $\lg g$. В определении этих параметров для звезд ШС сыграли важную роль фотометрические методы, использующие калибровки различных показателей цвета [3, 37, 38] и их теоретическое обоснование [13, 51], а в последнее время и другие методы, такие как метод ИК-потоков [4]. Анализ шкалы металличности, выполненный Беллом и Густавссоном [14], привел к изменению шкалы в сторону большего дефицита высокометалличных ШС (от -0.3 до -0.7 dex) из-за неучета в вычислениях источников непрозрачности в УФ и синей области. Создание многослойных моделей атмосфер для звезд с дефицитом металлов [12] позволило активно применить метод расчета синтетического спектра для исследования звезд с дефицитом металлов [137], а затем и для звезд ШС [9–11].

Гелий. В 1983 г. Буцони и др. [26] определили содержание гелия для ряда ШС, используя R-метод, опирающийся на эволюционные расчеты. Было получено среднее значение содержания гелия (по массе) равное Y = 0.23 ± 0.02. Саларис и др. в 2004 г. [106] переопределили содержание гелия и получили величину содержания гелия в галактических ШС Y = 0.250 ± 0.006. Однако в ряде работ показано, что содержание гелия может заметно различаться у звезд ШС. Так, пониженное содержание гелия у звезд синей части ГВ отмечалось по спектрам с умеренной дисперсией (см., например, [68]). В 2003 г. для звезд ГВ шаровых скоплений M 3 и M 13 с температурой $T_{эф} > 12\,000$ K по спектрам с высокой дисперсией уверенно обнаружено пониженное содержание гелия [87]. И если вариации содержания гелия на ГВ можно объяснить, например, диффузией, то в скоплении NGC 6218 (M 12, [Fe/H] = -1.31 ± 0.028 dex), Карреттой и др. [32] обнаружены вариации содержания натрия около вздутия (bump) на ВГ, которые, по мнению авторов, отражают различающееся начальное содержание гелия у рассматриваемых звезд.

Литий. Гиганты ШС не обнаруживают заметного содержания лития. Как и у гигантов гало, литий в их атмосферах истощается в процессе эволюции [35]. Только у трех гигантов трех шаровых скоплений M 3, M 5, NGC 362 обнаружен литий; один из них является переменной звездой АВГ типа W Vir (lg A(Li) = 3.0 [72], 1.8 [29], 1.2 [123], где lg A(Li) – содержание лития в шкале содержания водорода lg A(H) = 12). Предлагаемый механизм появления лития в атмосферах гигантов, т. н. “Be-transport” [27] – литий образуется в слое горения водорода на стадии АВГ и затем выносится в поверхностные слои вследствие глубокого перемешивания, в звездах АВГ солнечной металличности этот механизм действует в He-слое. На предмет поиска лития Пилачовски и др. [99] исследовали 261 гигант в четырех ШС: M 3, M 13, M 15, и M 92. Не было обнаружено ни одного гиганта, имеющего в спектрах линию лития с эквивалентной шириной $EW(\mathrm{Li}) > 20$ mÅ. В наших исследованиях гигантов ШС только звезда M 13 II-90 демонстрирует незначительное содержание лития lg A(Li) = –0.25, у остальных звезд нам не удалось его обнаружить [69]. Содержание лития у звезд точки поворота (ТП), т. е. практически у звезд ГП, близко к содержанию у звезд гало при этих металличностях [128]. Паскини и Моларо (1998 г.) [93] для звезд ТП скопления NGC 6397 получили значение lg A(Li) = 2.28 ± 0.10, в то же время субгиганты показали истощение лития и значения содержаний lg A(Li) = 1.81 и 1.2. Для звезд ТП скопления M 92 Боэсгаард и др. [17] получен разброс в содержании лития, lg A(Li) от 2.01 до 2.57, но среднее значение близко к значению, обнаруживаемому у звезд поля. Тэвна и др. [133] для звезд ГП скопления NGC 6397 получили значение лития lg A(Li) = 2.23 ± 0.07, что также хорошо согласуется со значениями, полученными для звезд гало [128]. В более поздних работах у звезд ТП величины содержания лития не столь однозначны: так в скопления NGC 6752 были обнаружены антикорреляции содержания Li, Na и N и антикорреляция с содержанием O [94].

Углерод, азот. Обнаруженные еще по первым спектрограммам, использующимся для спектральной классификации, ослабление и разброс интенсивностей полос молекул CN, NH, CH инспирировали значительное число работ по определению содержаний углерода, его изотопов, азота, а также работ по трактовке поведения интенсивностей полос, например [65].

Так, было обнаружено различие в поведении интенсивностей полос у гигантов ШС и поля – звезды поля не показывали заметный разброс интенсивностей в отличие от звезд скоплений [52, 116]. В то же время, интенсивности полос CN различались от скопления к скоплению, были обнаружены гиганты с усиленными полосами CN-strong и ослабленными полосами CN-weak [90]. Санцеф и Смит [129] обнаружили у гигантов скоплений M 3 и M 13, а Карбон и др. [28] – у гигантов скопления M 92, [Fe/H] = –2.24, дефицит углерода и избыток азота. Ряд скоплений проявили вариации содержаний углерода и азота, это скопления M 55, NGC 6397 [19]. Для скопления M 5 (также как и для M 92, M 3 и M 13) у гигантов в диапазоне светимостей $-2.0^m < M_V < -1.3^m$ обнаружены антикорреляции интенсивностей полос молекул CN – CH и содержаний N – C, истощение углерода [C/Fe] < -0.5 и заметное обогащение азотом $+0.5 <$ [N/Fe] $< +1.2$ [120]. Т. о., у гигантов ШС M 3, M 10, M 13 к середине 90-х годов были уверенно обнаружены антикорреляции между интенсивностями полос CN (λ 3883, 4215 Å) и CH, а также с содержанием кислорода [O/Fe] и углерода [C/Fe]. Процентное соотношение гигантов с усиленными полосами CN-strong и гигантов с ослабленными полосами CN-weak также отличается от скопления к скоплению. Так, у скопления M 10, отношение числа гигантов CN-strong к гигантам CN-weak равно 1:2, в то время как скопление M 13 содержит преимущественно гиганты CN-strong. Поскольку суммарное содержание [(C + N + 0)/Fe] оказалось тем же самым в пределах ошибок определений и для CN-strong и для CN-weak гигантов, была предложена гипотеза, что преобразованное вещество в реакциях C ⇒ N и O ⇒ N выносится на поверхность CN-strong гигантов [121]. Теории глубокого перемешивания предсказывают поверхностное истощение содержания углерода для звезд, более ярких, чем $M_V < -0.4^m$. Только в таких красных гигантах должна отсутствовать неоднородность молекулярной массы, запрещающая обращение (циркуляцию) между основанием конвективной оболочки и слоем горения водорода. Однако, спектроскопические исследования гигантов скопления M 92, выполненные Белменом и др. [15], обнаружили уменьшение содержания углерода на более низких светимостях ($M_V = 0.5$–1.0^m), чем предсказанные ($M_V = -0.4^m$). Дальнейшие исследования гигантов скопления M 3 [124] в диапазоне светимостей $1.5^m < M_V < 0^m$ показали, что содержание $C + N$ строго постоянно среди CN-weak гигантов, в то время как оно растет с продвижением вдоль ВГ для CN-strong звезд. Для объяснения привлечен гибридный сценарий, включающий более глубокое перемешивание и неоднородность дозвездного вещества. Ланжер и др. [76] обнаружили у субгигантов M 92 истощение углерода $\delta[C/Fe] \sim 1.0$ для звезд, восходящих по ВГ до вершины, и значительные вариации азота, которые по их мнению имеют дозвездное происхождение. Подобные вариации были обнаружены и для субгигантов скопления M 5 [19]. В работе 2002 г. по M 13 Брили и др. [20] обнаружили у субгигантов разброс на фактор ~ 6 в [C/Fe]. На основе этих наблюдений сделан вывод о существенной дисперсии [C/Fe] в протоскоплении и, возможно, других легких элементов среди всех звезд в M 13. При этом отмечено, что амплитуда разброса [C/Fe] может вызвать трудности при объяснении ее путем аккреции вещества от звезд асимтотической ветви гигантов АВГ средних масс как внешнего механизма "загрязнения". В работе 2004 г. Брили и др. [21] для звезд ГП ШС 47 Tuc найдены: 1) уверенные антикорреляции между [C/Fe] и [N/Fe] для CN-strong звезд, показывающих исчерпание углерода и обогащение азотом; 2) содержание обоих элементов находится в хорошем согласии с найденными для проэволюционировавших звезд ВГ этого скопления, за исключением небольших отличий со звездами с $M_V \sim +6.5^m$, находящимися на вершине ВГ; 3) полученное истощение C и обогащение N весьма подобно отмеченному для звезд ТП скопления M 71 идентичной металличности, но более низкой центральной концентрации и скорости убегания. В то же самое время, подобное повышенное содержание N и заметное уменьшение содержания C наблюдаются для аналогичных звезд в более бедном металлами скоплении M 5. Авторы интерпретируют эти результаты как свидетельство действия некоторого обогащения или аккреции в ранней истории скопления. Наиболее вероятный источник – это истечение вещества от звезд АВГ. Однако полученные результаты исключают простое поверхностное загрязнение и предполагают вовлечение в этот процесс большой доли масс звезд скопления. В этом же году Брили и др. [22] провели исследование содержаний углерода и азота у слабых звезд скопления M 13. С учетом работ других авторов по этому скоплению для звезд, находящихся в различных эволюционных стадиях, был отмечен заметный разброс содержания углерода для всех эволюционных стадий и заметное истощение углерода при продвижении вдоль ВГ. Звезды ШС вблизи ТП обнаружили вариации CN-, CH-полос в скоплениях NGC 6752 и M 4 [130] и 47 Tuc [56], что подтверждает также сценарий дозвездного обогащения.

Затем, CN-weak и CN-strong были найдены у ШС и среди звезд АВГ. Смит и Норрис [122] обнаружили CN вариации у звезд АВГ и ВГ скоплений M 5, M 4 и NGC 6752.

Изотопный состав углерода. Линии молекулы C_2 системы Свана были использованы для определения изотопного состава углерода у CH звезды [9] в скоплении ω Cen. Полученное отношение $^{12}C/^{13}C \sim 10$ несколько понижено по сравнению с предсказаниями стандартной теории. В работе Санцева и Смита [130] исследовались изотопы углерода в ШС NGC 6752 и M 4, имеющих бимодальное распределение полос CH. Обнаружено достаточно низкое по сравнению со стандартной теорией отношение изотопов $^{12}C/^{13}C \sim 3$–10. Для объяснения полученных значений привлечена гипотеза глубокого перемешивания. В 2003 г. Павленко и др. [95] проведены определения изотопного состава углерода у звезд четырех ШС M 71, M 5, M 3, M 13 по полосам молекулы CO на $2\,\mu$m. Обнаружены низкие значения величин $^{12}C/^{13}C \sim 3$–7, близкие к полученным ранее другими авторами. Рассмотрен ряд механизмов, приводящих к изменению поверхностного изотопного состава: меридиональная циркуляция [131], турбулентная диффузия [16], глубокое перемешивание (циркуляция) [18]. Пилачовски и др. [98] исследовали содержание изотопов в ряде гигантов в ШС M 3, включая гигант IV-101 с избытком лития. В то время как у трех гигантов обнаружено отношение $^{12}C/^{13}C \sim 6 \pm 1.5$, типичное для гигантов ШС, отношение изотопов углерода в богатом литием гиганте IV-101 $\sim 11 \pm 1.5$, выше, чем найденное в других гигантах скопления подобной температуры. Комбинация избыточного лития и $^{12}C/^{13}C$ для звезды IV-101 согласуется с предположением аномально энергетичного слоевого горения водорода и перемешивания в звездах низких масс и металличностей на восходящей ВГ.

Кислород. Избыточное по отношению к железу содержание кислорода у звезд с дефицитом металлов было обнаружено Конти и др. [39]. Проблема заключается в том, что содержания кислорода, определенные по запрещенным и разрешенным линиям O I и молекулярным особенностям (линии молекулы OH), не согласуются между собой [66]. Содержание O, определенное по линиям [O I] 6300, 6360 Å, [O/Fe] порядка 0.4 dex [66], более низкое, чем в случае использования линий инфракрасного триплета 7770 Å или УФ линий молекулы OH ([O/Fe] до 0.9 dex) [59]. Кроме того, определения содержания кислорода, основанные на линиях триплета кислорода на 7770 Å, показывают заметный тренд [O/Fe] с уменьшением металличности [33]. Ни неЛТР-расчеты [132], ни изменение шкалы температур [67] также не сняли существующих противоречий для этих двух групп линий. Ситуация усложнена тем, что линии [O I] используются в анализе гигантов, а ИК-триплета – у карликов при металличностях ниже –2.0 dex. Наши определения содержания кислорода для звезд с дефицитом металлов по линиям триплета, учитывающие неЛТР-эффекты, а также по запрещенной линии кислорода в ЛТР приближении [84] говорят о наличии тренда в поведении содержания O и заметных избытках содержания O в области $[Fe/H] \sim -3$ dex. Применение гидродинамических 3D-моделей дает еще один шанс решить данную проблему в рамках моделирования звездных атмосфер [89]. В целом, как показано в работе Щукиной и др. [114], при металличностях ~ -2 dex поправки в определении содержания по линиям триплета O I из-за неучета неЛТР-эффектов составляют ~ 0.2 dex и незначительны при использовании 3D-моделей. В случае запрещенной линии [O I] наблюдается обратная картина – незначительны (практически отсутствуют) неЛТР-поправки, а расчет с 3D-моделями требует коррекции ~ 0.2 dex. Одной из причин различий в содержании кислорода, обнаруживаемых у субкарликов ($[O/Fe] > 0.7$ dex при $[Fe/H] < -1.5$) и гигантов поля гало ([O/Fe] около 0.4 dex на тех же металличностях), может быть возможность ослабления (или полного исчезновения) запрещенной линии кислорода на 6300 Å: при темпе потери массы, ненамного превосходящем классический, вокруг гиганта формируется холодная, медленно расширяющаяся оболочка, и формирующаяся в этой оболочке эмиссионная линия кислорода может заполнить звездную абсорбционную линию [75]. Вопрос рассогласования содержания кислорода, полученного по разным группам линий все еще остается открытым [48]. Существующие проблемы определения содержания кислорода для звезд поля гало, соответственно, автоматически переносятся на звезды ШС подобной металличности. Определение содержания кислорода у звезд ШС обычно выполняется по запрещенной линии кислорода 6300 Å. В работе [102] получено, что содержание O у звезд ШС ниже, чем у звезд гало ($[O/Fe]_{ШС} < [O/Fe]_{гало}$), и значения содержаний находятся в пределах $-0.36 < [O/Fe] < 0.6$. Исследуя содержание кислорода в скоплении M 92 ($[Fe/H] = -2.2$), Пилачовски [100] обнаружила вариации содержания кислорода и антикорреляцию с содержанием азота. При этом суммарная величина $[(C + N + O)/Fe] = +0.03 \pm 0.05$, что свидетельствует в пользу действия ON-цикла горения водорода. Не считая скопления ω Cen, особым скоплением в поведении содержания легких элементов CNO в атмосферах гигантов является скопление M 13: исследования выявили заметные вариации содержания [O/Fe] от 0.46 до –0.76 dex! [10, 71, 102]. Антикорреляции между интенсивностями полос циана и содержанием кислорода обнаружены также для M 15 [116]. Интерпретация величин содержаний элементов CNO в скоплении M 13, предложенная в работе [119], – это первичная неоднородная распространенность элементов совместно с более поздними эффектами глубокого перемешивания в красных гигантах.

Натрий. Рассмотрим поведение элементов, образующихся в циклах протонного захвата, следующих после цепочки CNO циклов, и играющих важную роль в определении механизмов производства этих элементов, характеризующих процессы как протекающие в звездах ШС, так и обеспечивающих обогащение ШС. Начиная с первых работ по химическому составу звезд, содержание натрия показало заметный разброс и наличие избытков у ряда гигантов поля, а у K-гигантов с дефицитом металлов – нетривиальный ход с металличностью [1]. Пилачовски и др. [101] исследовали гиганты и субгиганты гало и не обнаружили избытков натрия, а нашли небольшой дефицит $[Na/Fe] = -0.17 \pm 0.22$ при некотором увеличении значений [Na/Fe] с продвижением вдоль эволюционной стадии и разбросом значений [Na/Fe] от –0.6 до +0.3. Определение содержания Na было выполнено Кареттой и др. [30]. Они нашли для звезд с $[Fe/H] < -0.6$ среднее значение $[Na/Fe] = -0.09 \pm 0.19$. Граттон и др. [49] оценили [Na/Fe] в звездах, бедных металлами, находящихся на ветви гигантов: для звезд нижней части ВГ содержание $[Na/Fe] = -0.09 \pm 0.15$, а для звезд верхней части $[Na/Fe] = -0.02 \pm 0.15$. Полученные значения в пределах ошибок совпадают между собой и также незначительно отличаются от среднего значения для гигантов гало. В отличие от звезд поля, гиганты бедных металлами шаровых скоплений ($[Fe/H] < -1.5$) показывают заметные избытки содержания Na и антикорреляции между содержаниями Na и кислорода O (или Al и O). Пилачовски др. [102] проведено исследование 57 гигантов, принадлежащих ряду ШС, и найдено среднее значение $<[Na/Fe]> = 0.24$, более высокое, чем у звезд поля с дефицитом. Этими же авторами отмечены антикорреляции, в частности, содержаний Na и O и указано, что их природа неопределенна. В одной из первых работ по объяснению причин избытков натрия Коттрелл и да Коста [40] предположили, что ^{23}Na может быть синтезирован нейтронным захватом ^{22}Ne в процессе горения гелия. В более поздних работах избыток Na в этих звездах объясняют, с одной стороны, синтезом натрия в высокотемпературном NeNa-цикле протонного захвата у звезд, находящихся на ГП, и последующим выносом вещества, обогащенного Na (и обедненного O) на поверхность в стадии гиганта [41, 43, 75]. Хотя антикорреляция O–Na существует среди ярких гигантов большинства ШС ($[Fe/H] < -1$) [71], скопление M 13 выделяется высоким процентом звезд с дефицитом кислорода ($[O/Fe] < -0.4$) и соответствующими избытками натрия ($[Na/Fe] > +0.4$). Другие скопления имеют менее выраженные вариации содержания кислорода, а звезды поля имеют незначительный разброс и избыток содержания кислорода. Следует отметить, что гиганты богатых металлами шаровых скоплений, например, M 71 ([Fe/H] = −0.8), имеют отношение [Na/Fe], близкое к нулю, т. е. демонстрируют солнечную пропорцию. Поскольку разброс интенсивностей полос CH, CN и антикорреляции Na–O были обнаружены и среди карликов ШС, наблюдаемый разброс Na может быть также вызван неоднородностью начального химического состава.

Магний, алюминий. Как известно, у звезд поля гало магний находится в избытке (около 0.3–0.5 dex), как и другие α-элементы [85]. Как мы уже упоминали, глубоким перемешиванием, затрагивающим слой реакций на ядрах CNO, можно объяснить обнаруженную антикорреляцию содержаний натрия и кислорода у части гигантов ШС. Ланжер и др. [75] также предположили, что при синтезе натрия в NeNa-цикле алюминий может синтезироваться в MgAl-цикле. Для интервала металличностей $-1.9 < [\mathrm{Fe/H}] < -1.0$ по выборке звезд поля и ШС обнаружена корреляция содержаний натрия и алюминия, качественно подтверждающая предположение Ланжера и др. [75]. Антикорреляция Mg–Al обнаружена у звезд скопления M 13 [70] и ω Cen [91]. При этом содержание алюминия изменяется на фактор 30, а магния только на фактор 3. Яркие гиганты скопления ω Cen показывают не только корреляции Mg–Al, подобные M 13, но и одинаковый диапазон содержаний магния и алюминия, $[\mathrm{Mg/Fe}] \sim 0.4$–$0.0$ и $[\mathrm{Al/Fe}] \sim 0.0$–$1.0$. К тому же, в скоплении M 13 распределение содержания алюминия [Al/Fe] носит бимодальный характер вдоль всей ВГ, в то время как распределение содержания натрия [Na/Fe] бимодально только для звезд, светимостью выше $M_V \sim 2^m$ [34]. В то же время, гиганты высокометалличного скопления M 71 не показали подобных корреляций [37], а в NGC 7006 [70] эта зависимость не столь явна. Mg–Al-антикорреляции, подобные найденным в скоплении M 13, но в меньшей степени, обнаружил Шетрон [115] в ярких гигантах скоплений M 92 и M 5. Часть трудностей в исследовании Mg–Al-корреляций обусловлена трудностями определения реального содержания магния и алюминия. Обычно использующиеся линии магния 5528, 5711 Å достаточно сильные, их интенсивность зависит от выбора турбулентной скорости и (или) констант уширения; линии же алюминия λ 6688 Å ослабевают при $[\mathrm{Fe/H}] < -1.5$, а резонансные значительно подвержены отклонениям от ЛТР. И все же наблюдательные трудности не могут полностью отрицать наличие Mg–Al-корреляций у звезд ряда ШС. Ланжер и др. [77] предположили, что тепловая (термальная) нестабильность водородного слоя H могла бы объяснить аномальные содержания Na и Al, наблюдаемые в красных гигантах ШС. Используя современные параметры реакции, при температурах $\sim (70$–$75) \cdot 10^7$ K возможно производство наблюдаемых избытков Al и истощения Mg. В работе [82] осуществляется попытка моделирования нестабильности слоя H простым механизмом изменения выработки энергии в области слоевого горения H. Показано, что незначительные температурные неустойчивости минимально изменяют поверхностное содержание.

Изотопный состав магния. В работе [115] проведено исследование изотопов Mg по линиям молекулы MgH в трех звездах скопления M 13. Звезды с низким содержанием Mg и высоким содержаниям Al обладают соотношением $(^{25}\mathrm{Mg} + {}^{26}\mathrm{Mg})/{}^{24}\mathrm{Mg}$, превышающим солнечное, что указывает на преимущественное разрушение ^{24}Mg в MgAl цикле. MgAl цикл проходит с более высокой температурой ($T \sim 7 \cdot 10^8$ K [42]), чем значение температуры, которое может быть достигнуто в канонических моделях горения водорода в слое в звездах низких масс и низких металличностей. Может существовать два решения этого вопроса: 1) новые расчеты нуклеосинтеза, постулирующие температурные нестабильности горения водорода в слое и рост температуры до высоких значений или 2) обогащение скопления продуктами нуклеосинтеза в звездах больших масс предыдущих поколений, для которых нет проблем с достижением высокой температуры. Но не понятно, каким образом эти звезды обогащают скопление так, что формирующиеся впоследствии звезды получают разное количество вещества, прошедшего через цикл протонного захвата. Ответом на этот вопрос является работа Йонга и др. [143], выполненная для звезд скоплений M 13 и M 71, в которой показано, что два поколения звезд АВГ производят наблюдаемые отношения изотопов. Первое поколение бедных металлами звезд АВГ обогащает скопление и является ответственным за высокое содержание изотопов $^{25}\mathrm{Mg}/{}^{24}\mathrm{Mg}$ и $^{26}\mathrm{Mg}/{}^{24}\mathrm{Mg}$ в звездах скоплений с химическим составом, идентичным звездам поля той же металличности.

Сравнительный анализ содержаний Na, Mg, и Al для двух скоплений M 3 и M 13 [63] показал, что содержания этих элементов в звездах M 13 на 0.10–0.20 dex выше, чем в M 3 (т. е. у звезд скопления M 13 возможен дополнительный синтез с протонным захватом). А сравнение с гигантами поля гало говорит в пользу того, что аномальное содержание O, Na, Mg, и Al в звездах скоплений M 3 и M 13 имеет первичную (дозвездную) природу. В работе [126] проведено исследование гигантов скоплений M 3, M 13 и звезд поля подобной металличности. Все три группы показывают истощение C с продвижением вдоль ВГ, начинающееся на уровне вздутия (bump) на ВГ, но при этом содержания углерода приблизительно на 0.7–0.9 dex ниже в звездах ШС, чем в звездах поля. Поведение O, Na, Mg, и Al четко различается для трех звездных групп. Гиганты поля гало и субкарлики демонстрируют положительную корреляцию Na с Mg, как предсказывают теории взрывного или гидростатического горения углерода в сверхновых II типа. Звезды скоплений M 3 и M 13 приводят доказательство прохождения реакций высокотемпературного синтеза с участием захвата протонов в ON-, NeNa-, и MgAl-циклах, в то время как нет никакого свидетельства такого синтеза у звезд гало. Но степень синтеза с захватом протонов в M 3 меньше (ниже), чем у M 13: гиганты M 3 показывают только небольшой дефицит O и соответствующее увеличение содержания Na, менее высокие содержания Al, меньшее количества звезд с низким Mg и соответственно высоким Na, и нет никакого признака того, что истощения O – функция продвижения вдоль ВГ, как это найдено для M 13. В работе [8] численно исследованы аномалии химического состава в Галактических ШС, опираясь на сценарий внешнего загрязнения. Рассмотрена неоднородность содержания легких элементов C, N, O, Na и Al в звездах ШС с использованием последних звездных моделей бедных металлами звезд АВГ с учетом и без учета третьего эпизода перемешивания. Результаты для моделей без учета третьего черпка более совместимы с наблюдениями. Они объясняют заметный разброс содержаний [N/Fe] и [C/Fe], бимодальность распределения [N/Fe] в некоторых ШС, корреляцию содержания гелия с [N/Fe] и [Al/Fe] и антикорреляцию с [C/Fe], [O/Fe] и [Na/Fe] внутри ШС, антикорреляции C–N и Mg–Al, но находятся в разногласии с наблюдаемой антикорреляцией O–Na.

α-элементы и элементы железного пика. Элементы, синтезируемые в реакциях присоединения α-частиц (Mg, Si, Ca и Ti), показывают обогащение (относительно ядер железа) в атмосферах старых звезд в галактическом поле ~ 0.3–0.5 dex [85], что свидетельствует в пользу различных путей пополнения межзвездной среды железом и элементами α-процесса. Как показано в работе [140], элементы α-процесса (в том числе и кислород) образуются внутри очень массивных звезд, впоследствии взрывающихся как сверхновые II типа, а существенная доля элементов железного пика может производиться во время взрыва двойных белых карликов (сверхновые Ia типа). Одно из первых определений содержаний α-элементов в звездах ШС выполнено Пилачовски и др. [102]. В работе показано, что распространенность α-элементов в гигантах ШС подобна распространенности в карликах поля, звездах типа RR Lyr поля и гигантах гало. В скоплении NGC 6397 [133] получено содержание α-элементов (Ca, Ti) и элементов железного пика (Sc, Cr, Ni), которое согласуется с содержанием, определенным для звезд поля подобной металличности, содержание Mg, Na – околосолнечное, металличность скопления $[\mathrm{Fe/H}] \sim -2$. Это говорит в пользу хорошего перемешивания межзвездной среды на эпоху формирования скопления. В работе Хейнеса и др. [53] у звезд скопления M 10 исследованы содержания Al, α-элементов, элементов железного пика и элементов, образующихся в процессах нейтронного захвата. Средняя металличность скопления равна $<[\mathrm{Fe/H}]> = -1.45 \pm 0.04$, обнаружен избыток алюминия $<[\mathrm{Al/Fe}]> \sim 0.33 \pm 0.19$ и α-элементов: $+0.2 - +0.4$, элементы железного пика показывают солнечное отношение к железу $[\mathrm{El/Fe}] \sim 0$, содержание европия находится в избытке $<[\mathrm{Eu/Fe}]> \sim +0.41$. За исключением магния, содержания α-элементов и элементов железного пика подобны для звезд поля и звезд большинства ШС (не считая ω Cen и M 22) [2].

Содержание железа, металличность. Звезды ШС, как правило, показывают незначительный разброс металличности, за исключением двух скоплений ω Cen и M 22. Для ω Cen наблюдается бимодальность в распределении металличности и значения лежат в пределах $-2.20 < [\mathrm{Fe/H}] < -0.70$ [64]. Для скопления M 22 разброс металличности ~ 0.5 dex [61]. Для других скоплений, как можно видеть выше в тексте, дисперсия металличности незначительна. Например, средняя металличность скопления NGC 2808 равна $[\mathrm{Fe/H}] = -1.10 \pm 0.0065$ dex по 123 звездам [31]. Не только спектральные, но и все использующиеся методы определения металличности дают заметную однородность по этому параметру внутри скопления (см., например, для скопления M 5 по V, I фотометрии [54]). Однако определение содержания железа и металличности по спектрам сталкивается с рядом проблем. Это, прежде всего, учет влияния отклонений от ЛТР на определение содержания железа. Отклонениям от ЛТР в большей степени подвержены линии нейтрального железа. Это сказывается на определении ускорения силы тяжести $\lg g$ по условию ионизационного равновесия для атомов Fe I и Fe II. НеЛТР-поправки равны 0.1 dex на $[\mathrm{Fe/H}] = -1$ и 0.2 dex на $[\mathrm{Fe/H}] = -2.5$ [134]. Однако, в работе Щукиной и др. [114] найденные неЛТР-поправки для содержания железа, определенного по линиям Fe I, достигают ~ 0.9 и ~ 0.6 dex в 3D- и 1D-моделях соответственно. При использовании линий Fe II они меньше, и равняются 0.4 dex для 3D-моделей. НеЛТР-подход при исследовании ШС для определения $\lg g$ и [Fe/H] был использован при сравнительном исследовании звезд ВГ и АВГ скопления M 5 [60]. Значения металличности этого скопления, полученные разными авторами, равны –1.4, –1.17, –1.11, –1.21 (см. ссылки в [60]). Звезды ВГ и АВГ не показали заметных отличий в содержании исследуемых элементов. Для одной и той же звезды с учетом и без учета неЛТР-поправок получено отличие в $T_{\text{эф}}$ – 50 K, в $\lg g$ – 0.13, в V_t – 0.05, в содержании железа, определенного по линиям Fe I, – 0.05, по линиям Fe II – 0.09, в целом по металличности [Fe/H] – 0.1 dex. В действительности, это небольшие отличия, практически находящиеся в пределах ошибок определений. Как способ избежать влияния отклонений от ЛТР на определение содержания железа, в работе [73] в качестве металличности принято значение железа, определенное по линиям Fe II, менее подверженным влиянию отклонений от ЛТР. Использование линий железа различных стадий ионизации для определения содержания железа у горячих звезд ШС выявило еще одну проблему. Томпсон и др. [135] для горячих звезд скоплений M 13 и ω Cen обнаружили, что содержание Fe, определенное по линиям поглощения Fe III в области длин волн 1875–1900 Å, ниже на 0.5 dex для звезды Barnard29 (M 13) и на 0.8 dex для звезды ROA5701 (ω Cen). Ультрафиолетовые линии Fe III систематически давали заниженное значение на 0.6 dex. Затем, Томпсоном и др. [136] были проанализированы параметры линий и предложен список надежных линий Fe III в этой области спектра для определения содержания железа.

Марганец. В 2006 г. [127] исследовано содержание марганца у 200 звезд 19 ШС, находящихся в диапазоне металличности $-2.7 < [\mathrm{Fe/H}] < -0.7$. Получено, что поведение и средние содержания для звезд ШС $<[\mathrm{Mn/Fe}]> = -0.37 \pm 0.07$ и поля гало $<[\mathrm{Mn/Fe}]> = -0.36 \pm 0.08$ подобны.

Медь и цинк. В 2003 г. нами на основе однородного спектрального материала было выполнено исследование содержаний меди и цинка у 90 звезд с дефицитом металлов [86]. НеЛТР-содержание меди в звездах ШС исследовано в работе Симмерер и др. [117]. Авторы провели сравнение данных для звезд ШС и поля с введением неЛТР-поправок для результатов работы [86]. В целом, наблюдаются сходные тренды для гигантов поля гало и шаровых скоплений. Но для скопления ω Cen тренд отсутствует полностью, значение [Cu/Fe] демонстрирует одинаковый дефицит в широком диапазоне металличностей. В области металличности ~ -1.35 (и скопления M 5), отношение [Cu/Fe] начинает быстро расти как у гигантов поля гало, так и у высокометалличных скоплений ($[\mathrm{Fe/H}] > -1.35$).

Элементы, образующиеся в процессах нейтронных захватов. Элементы за железным пиком образуются в процессах нейтронных захватов, которые разделяются на медленный, s-процесс и быстрый r-процесс по сравнению с β-распадом. Имеется большой ряд источников, ответственных за прохождение этих процессов, от массивных сверхновых II типа до звезд АВГ. Так, звезды на стадии АВГ имеют углеродно-кислородное ядро и два слоевых источника горения гелия и водорода. В зоне горения гелия температура может достигать значений, обеспечивающих эффективное производство нейтронов путем реакции присоединения α-частицы к ядру ^{22}Ne посредством реакции $^{23}\mathrm{Ne}\,(\alpha,\ n)^{25}\mathrm{Mg}$. Эти нейтроны могут быть захвачены другими легкими элементами, создавая существенное обогащение азотом, натрием и алюминием. При этом нейтронный поток может оказаться достаточным также для обеспечения цепочки s-процесса. В целом, содержания элементов, образующихся в процессах нейтронных захватов, показывают как разброс от скопления к скоплению и отличие в содержании от звезд поля гало, так и хорошее согласие с результатами по звездам гало. В 1992 г. Браун и Валлерстейн [23] для звезд трех ШС обнаружили заметные отличия в содержании не только элементов s- и r-процессов, но и отличия внутри подгруппы элементов и звезд внутри скопления. В 1994 г. Вантуре и др. [138] исследовали три звезды с усиленными линиями тяжелых элементов в скоплении ω Cen, диапазон металличности $-2 < [\mathrm{Fe/H}] < -0.5$. Для объяснения обнаруженных ими избытков Rb, Y, и Zr > 1.4 dex была выдвинута гипотеза об обогащении продуктами выбросов звезд АВГ до обогащения продуктами сверхновых типа Ia. Ивенс и др. провели исследование содержаний элементов в ШС M 4 ($<[\mathrm{Fe/H}]> = -1.18$) и M 5 [60] и сравнили со звездами поля гало. Было получено, что в скоплении M 4 разброс содержания Eu от звезды к звезде не превышает ± 0.1, при этом наблюдается избыток содержания Eu у всех звезд скоплений и поля гало подобной металличности. Ba и La находятся в избытке по сравнению с содержанием в звездах других скоплений подобной металличности, в звездах скопления M 5 и поля гало. Снеден и др. [125] определили содержание Ca, Ba и Na в звездах скопления M 15. Средние значения содержания $<[\mathrm{Ba/Ca}]>$ существенно отличаются для звезд скоплений M 15 и M 92 и равны -0.1 и -0.4 соответственно. Примечательна работа Джеймса и др. [62] по определению содержания Sr, Y, Ba и Eu у субгигантов и звезд ТП в ШС NGC 6397, NGC 6752 и 47 Tuc/NGC 104 с металличностью $[\mathrm{Fe/H}] = \sim -2.0, -1.5, -0.7$ соответственно. Авторы нашли единообразное обогащение элементами r- и s-процессов и совпадающую распространенность содержаний данных элементов у звезд рассмотренных ШС и поля гало. Оцуки и др. [92] исследовали содержание элементов Y, Zr, Eu в скоплении M 15. Обнаружен разброс в содержании, особенно Eu, от звезды к звезде, антикорреляция между отношением легких (Y, Zr, s-процесс) к тяжелым (Eu, r-процесс) элементам нейтронного захвата ([Y/Eu] и [Zr/Eu]) и Eu. Установлена сложная история обогащения протоскопления и скопления. Содержание бария, рубидия и свинца исследовано в ШС M 4 и M 5 [142]. Для звезд скопления M 4 найден избыток $[\mathrm{Ba/Fe}] = +0.6$, $[\mathrm{Rb/Fe}] = 0.39 \pm 0.02$ и $[\mathrm{Pb/Fe}] = 0.30 \pm 0.02$, для звезд скопления M 5 обнаружена солнечная пропорция $[\mathrm{Ba/Fe}] = 0.0$, $[\mathrm{Rb/Fe}] = 0.00 \pm 0.05$ и дефицит $[\mathrm{Pb/Fe}] = -0.35 \pm 0.02$. Скопление M 4 обладает более высоким содержанием этих элементов.

К сожалению, нам не удалось отразить все вопросы, касающиеся химического состава ШС, в том числе, проблем горячих звезд ГВ, второго параметра, обогащения и самообогащения скоплений. Это предмет дальнейших наших обсуждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Со вступлением в строй больших телескопов и прогрессом в моделировании звездных атмосфер возрос интерес к исследованию слабых объектов, в том числе, звезд шаровых скоплений, охватывающих всю диаграмму цвет – звездная величина скопления. Такой многосторонний подход позволил ответить на многие вопросы, рассмотреть химический состав с различных точек зрения, но не поставить окончательную точку. Использование неЛТР-подхода, гидродинамических моделей и спектров высокого разрешения для ярких и слабых звезд ШС остается актуальным и до настоящего времени, как и требование новых расчетов нуклеосинтеза, изучения процессов, охватывающих внутренние слои звезды и атмосферу, построения моделей химической эволюции Галактики и шаровых скоплений.

[1] *Мишенина Т. В., Ковтюх В. В., Коротин С. А., Субиран К.* Содержание натрия в атмосферах звезд различной металличности // Астрон. журн. – 2003. – **80**, № 5. – С. 423–430.

[2] *Мишенина Т. В., Панчук В. Е., Самусь Н. Н.* Химический состав звезд шаровых скоплений M10, M12, M71 // Астрон. журн. – 2003. – **80**, № 3. – С. 274–279.

[3] *Alonso A., Arribas S., Martinez-Roger C.* Determination of effective temperatures for an extended sample of dwarfs and subdwarfs (F0–K5) // Astrophys. J. Suppl. Ser.– 1996. – **117**. – P. 227–254.

[4] *Alonso A., Arribas S., Martinez-Roger C.* The effective temperature scale of giant stars (F0–K5). I. The effective temperature determination by means of the IRFM // Astrophys. J. Suppl. Ser.– 1999. – **139**. – P. 335–358.

[5] *Ashman K. M., Zepf S. E.* The formation of globular clusters in merging and interacting galaxies // Astrophys. J. – 1992. – **384**, N 1. – P. 50–61.

[6] *Barnard E. E.* Some abnormal stars in the cluster M13 in Hercules // Astrophys. J. – 1900. – **12**. – P. 176–181.

[7] *Baum W. A.* Globular clusters. 1. Photoelectric spectroscopic observations in M3 and M92 // Astron. J. – 1952. – **57**. – P. 222–227.

[8] *Bekki K., Campbell S. W., Lattanzio J. C., Norris J. E.* Origin of abundance inhomogeneity in globular clusters // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2007. – **377**. – P. 335–351.

[9] *Bell R. A., Dickens R. J.* The CNO abundances of the CH stars in Omega Centauri // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1974. – **166**. – P. 89–99.

[10] *Bell R. A., Dickens R. J.* Chemical abundances in the globular clusters M3, M13, and NGC 6752 // Astrophys. J. – 1980. – **242**. – P. 657–672.

[11] *Bell R. A., Dickens R. J., Gustafsson B.* Carbon abundances in red giant stars in the globular clusters M92 and NGC 6397 // Astrophys. J. – 1979. – **229**. – P. 604–623.

[12] *Bell R. A., Eriksson K., Gustafsson B., Nordlund A.* A grid of model atmospheres for metal-deficient giant stars. II. // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1976. – **23**. – P. 37–95.

[13] *Bell R. A., Gustafsson B.* The Colours of G and K Type Giant Stars. II. // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1978. – **34**. – P. 229–240.

[14] *Bell R., Gustafsson B.* The abundance scale of the galactic globular clusters // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1983. – **204**. – P. 249–271.

[15] *Bellman S., Briley M. M., Smith G. H., Claver C. F.* Carbon abundances of M92 red giant branch stars // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2001. – **113**, N 781. – P. 326–334.

[16] *Biénayme O., Maeder A., Schatzman E.* Stellar evolution with turbulent diffusion mixing. IV. Intermediate and low mass stars and C-12/C-13 ratio in giants of the first ascending branch // Astron. and Astrophys. – 1984. – **131**, N 2. – P. 316–326.

[17] *Boesgaard A. M., Deliyannis C. P., Stephens A., King J. R.* Primordial lithium: Keck Observations in M92 Turnoff Stars // Astrophys. J. – 1998. – **493**. – P. 206–216.

[18] *Boothroyd A., Sackmann J.* The CNO Isotopes: Deep Circulation in Red Giants and First and Second Dredge-up // Astrophys. J. – 1999. – **510**, N 1. – P. 232–250.

[19] *Briley M. M., Smith G. H., Bell R. A., et al.* CN and CH variations on the M5 subgiant branch // Astrophys. J. – 1992. – **387**. – P. 612–621.

[20] *Briley M. M., Cohen J. G., Stetson P. B.* Abundances of Faint Stars in M13: Evidence of Two Abundance-altering Mechanisms // Astrophys. J. – 2002. – **579**. – P. L17–L20.

[21] *Briley M. M., Harbeck D., Smith G. H., Grebel E. K.* On the carbon and nitrogen abundances of 47 Tucanae's main-sequence stars // Astron. J. – 2004. – **127**. – P. 1588–1593.

[22] *Briley M. M., Cohen J. G., Stetson P. B.* The Chemical Inhomogeneity of Faint M13 Stars: Carbon and Nitrogen Abundances // Astron. J. – 2004. – **127**. – P. 1579–1587.

[23] *Brown J. A., Wallerstein G.* High-resolution CCD spectra of stars in globular clusters. VII. Abundances of 16 elements in 47 Tuc, M4, and M22 // Astron. J. – 1992. – **104**, N 5. – P. 1818–1830.

[24] *Burbidge E. M, Burbidge G. R.* The Chemical Compositions of Five Stars which Show Some of the Characteristics of Population II // Astrophys. J. – 1956. – **124**. – P. 116–129.

[25] *Butler D.* Metal abundances of RR Lyrae stars in galactic globular clusters // Astrophys. J. – 1975. – **200**. – P. 68–81.

[26] *Buzzoni A., Fusi Pecci F., Buonanno R., Corsi C. E.* Helium abundance in globular clusters: the R-method // Astron. and Astrophys. – 1983. – **128**, N 1. – P. 94–101.

[27] *Cameron A. G. W., Fowler W. A.* Lithium and s-process in Red-Giant Stars // Astrophys. J. – 1971. – **164**. – P. 111–114.

[28] *Carbon D. F., Romanishin W., Langer G. E., et al.* Carbon and nitrogen abundances in giant stars of the metal-poor globular cluster M92 // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1982. – **49** – P. 207–258.

[29] *Carney B., Fry A. M., Gonzalez G.* Lithium and r-process Abundances in the Population II Cepheid M5 V42 // Astron. J. – 1998. – **116**. – P. 2984–2992.

[30] *Carretta E., Gratton R. G., Sneden C.* Abundances of light elements in metal-poor stars. III. Data analysis and results // Astron. and Astrophys. – 2000. – **356**. – P. 238–252.

[31] *Carretta E., Bragaglia A., Cacciari C.* Star-to-star Na and O abundance variations along the red giant branch in NGC 2808 // Astrophys. J. – 2004. – **610**. – P. L25–L28.

[32] *Carretta E., Bragaglia A., Gratton R. G., et al.* Na–O anticorrelation and horizontal branches. IV. Detection of He-rich and He-poor stellar populations in the globular cluster NGC 6218 // Astron. and Astrophys. – 2007. – **464**. – P. 939–951.

[33] *Cavallo R. M., Pilachowski C. P., Rebolo R.* Oxygen Abundances in Metal Poor Subgiant Stars from the O I Triplet // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1997. – **109**, N 731. – P. 226–235.

[34] *Cavallo R. M., Nagar N. M.* Aluminum abundances, deep mixing, and the blue-tail second-parameter effect in the globular clusters M3 and M13 // Astron. J. – 2000. – **120**. – P. 1364–1383.

[35] *Chaboyer B., Demarque P.* ^{7}Li abundances in halo stars: Testing stellar evolution models and the primordial ^{7}Li abundance // Astrophys. J. – 1994. – **433**. – P. 510–519.

[36] *Chamberlain J. W., Aller L. H.* The Atmospheres of A-Type Subdwarfs and 95 Leonis // Astrophys. J. – 1951. – **114**. – P. 52–72.

[37] *Cohen J. G.* Abundances in globular cluster red giants. III. M71, M67 and NGC 2420 // Astrophys. J. – 1980. – **241**. – P. 981–1000.

[38] *Cohen J. G.* Abundances in globular cluster red giants. V. The metal-rich globular clusters // Astrophys. J. – 1983. – **270**. – P. 654–665.

[39] *Conti P. S., Greenstein J. L., Spinrad H. E., et al.* Neutral Oxygen in Late-Type Stars // Astrophys. J. – 1967. – **148**. – P. 105–128.

[40] *Cottrell P. L., Da Costa G. S.* Correlated cyanogen and sodium anomalies in the globular clusters 47 Tuc and NGC 6752 // Astrophys. J. – 1981. – **245**. – P. L79–L82.

[41] *Denisenkov P. A., Denisenkova S. N.* Possible Explanation of the Correlation Between Nitrogen and Sodium Over Abundances for Red Giants in Globular Clusters // Astron. Tsirk. – 1989. – N 1538. –P. 11.

[42] *Denissenkov P. A., Da Costa G. S., Norris J. E., Weiss A.* The puzzling MgAl anticorrelation in globular-cluster red giants: primordial plus deep mixing scenario? // Astron. and Astrophys. – 1998. – **333**. – P. 926–941.

[43] *Denissenkov P. A., Weiss A.* Deep diffusive mixing in globular-cluster red giants // Astron. and Astrophys. – 1996. – **308**. – P. 773–784.

[44] *Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R.* Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed // Astrophys. J. – 1962. – **136**. – P. 748–766.

[45] *Fath E. A.* The spectra of spiral nebulae and globular star clusters // Lick Observatory Bulletin. – 1909. – **5**. – P. 71–77.

[46] *Fath E. A.* The spectra of spiral nebulae and globular star clusters. Third paper // Astrophys. J. – 1913. – **37**. – P. 198–203.

[47] *Faulkner J.* On the Nature of the Horizontal Branch. I. // Astrophys. J. – 1966. – **144**. – P. 978–994.

[48] *Garcia Perez A. E., Asplund M., Primas F., et al.* Oxygen abundances in metal-poor subgiants as determined from [O I], O I and OH lines // Astron. and Astrophys. – 2006. – **451**. – P. 621–642.

[49] *Gratton R. G., Sneden C., Carretta E., Bragaglia A.* Mixing along the red giant branch in metal-poor field stars // Astron. and Astrophys. – 2000. – **354**. – P. 169–187.

[50] *Greenstein J. L., Cuffey J.* A B-type Star of Population II // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1954. – **66**, N 391. – P. 187–190.

[51] *Gustafsson B., Bell R. A.* The Colours of G and K Type Giant Stars. I. // Astron. and Astrophys. – 1979. – **74**. – P. 313–352.

[52] *Hartwick F. D. A., McClure R. D.* A discontinuity in cyanogen strengths between giant stars of the disk and the halo // Astrophys. J. – 1980. – **235**, N 2. – P. 470–477.

[53] *Haynes S., Burks G., Johnson C. I., Pilachowski C.* Chemical analysis of five red giants in the globular cluster M10 (NGC 6254) // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2008. – **120**, N 872. – P. 1097–1102.

[54] *Heald A. J., Griffiths W. K., Penny A. J., Morris P. W.* The metal homogeneity of the globular star cluster M5 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1999. – **307**, N 4. – P. 789–801.

[55] *Helfer H. L., Wallerstein G., Greenstein J. L.* Abundances in Some Population II K Giants // Astrophys. J. – 1959. – **129**. – P. 700–719.

[56] *Hesser J. E., Smith G. H., Bolte M., et al.* CN, CH variations Near the 47 Tucanae Main Sequence // Bull. Amer. Astron. Soc. – 1993. – **25**. – P. 1408.

[57] *Huggins W., Huggins L.* An Atlas of Representative Stellar Spectra from λ 4870 to λ 3300 // Science. – 1901. – **13**, N 319. – P. 222–224.

[58] *Huggins W., Miller W. A.* On the Spectra of Some of the Nebulae // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1864. – **154**. – P. 437–444.

[59] *Israelian G., Garcia Lopez R. G., Rebolo R.* Oxygen Abundances in Unevolved Metal-poor Stars from Near-Ultraviolet OH Lines // Astrophys. J. – 1998. – **507**, N 2. – P. 805–817.

[60] *Ivans I., Kraft R., Sneden C., et al.* New Analyses of Star-to-Star Abundance Variations among Bright Giants in the Mildly Metal-poor Globular Cluster M5 // Astron. J. – 2001. – **122**, N 3. – P. 1438–1463.

[61] *Ivans I. I., Sneden C., Wallerstein G., et al.* On the question of a metallicity spread in globular cluster M22 (NGC 6656) // Mem. Soc. Astron. Ital. – 2004. – **75**. – P. 286–289.

[62] *James G., Francois P., Bonifacio P., et al.* Heavy elements and chemical enrichment in globular clusters // Astron. and Astrophys. – 2004. – **427**. – P. 825–838.

[63] *Johnson C. I., Kraft R. P., Pilachowski C. A., et al.* A 235 star sample sodium, magnesium, and aluminum abundance study in the globular clusters M3 (NGC 5272) and M13 (NGC 6205) // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2005. – **117**. – P. 1308–1324.

[64] *Johnson C. I., Pilachowski C. A., Simmerer J., Schwenk D.* Fe and Al abundances for 180 red giants in the globular cluster omega Centauri (NGC 5139) // Astrophys. J. – 2008. – **681**, N 2. – P. 1505–1523.

[65] *Kayser A., Hilker M., Grebel E. K., Willemsen P. G.* Comparing CN and CH line strengths in a homogeneous spectroscopic sample of 8 Galactic globular clusters // Astron. and Astrophys. – 2008. – **486**. – P. 437–452.

[66] *King J., Boesgaard A.* Stellar oxygen abundances. 4: Systematic effects on oxygen abundances derived from the 6300 Å (O I) and 7774 Å O I lines // Astron. J. – 1995. – **109**, N 1669. – P. 383–395.

[67] *King J.* Galactic [O/Fe] and [C/Fe] Ratios: The Influence of New Stellar Parameters // Astron. J. – 2000. – **120**. – P. 1056–1071.

[68] *Klochkova V. G., Panchuk V. E.* The chemical composition of globular cluster horizontal-branch stars in the galactic field // Sov. Astron. – 1985. – **29**. – P. 320–322.

[69] *Klochkova V. G., Mishenina T. V., Panchuk V. E.* Investigation of the II-90 giant in the globular cluster M13 // Astron. and Astrophys. – 1994. – **287**. – P. 881–884.

[70] *Kraft R., Sneden C., Smith G., et al.* Proton Capture Chains in Globular Cluster Stars. II. Oxygen, Sodium, Magnesium, and Aluminum Abundances in M13 Giants Brighter than the Horizontal Branch // Astron. J. – 1997. – **113**, N 1. – P. 279–295.

[71] *Kraft R., Sneden C., Langer G. E., Shetrone M. D.* Oxygen abundance in halo giants. V. The oxygen-sodium anticorrelation in a sample of 22 bright giants in M13 // Astron. J. – 1993. – **106**, N 4. – P. 1490–1507.

[72] *Kraft R. P., Peterson R. C., Guhathakurta P., et al.* An Extremely Lithium-rich Bright Red Giant in the Globular Cluster M3 // Astrophys. J. – 1999. – **518**. – P. L53–L56.

[73] *Kraft R. P., Ivans I. I.* A globular cluster metallicity scale based on the abundance of Fe II // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2003. – **115**, N 804. – P. 143–169.

[74] *Kron G. E., Guetter H. H.* Six-color photometry of globular clusters – Another look at determinations of reddening and metal abundance // Astron. J. – 1976. – **81**. – P. 817–831.

[75] *Langer G. E., Hoffman R., Sneden C.* Sodium-oxygen abundance anticorrelations and deep-mixing scenarios for globular-cluster giants // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1993. – **105**, N 685. – P. 301–307.

[76] *Langer G. E., Kraft R., Carbon D. F., et al.* On the carbon abundance of subgiant stars in the globular clusters M92 // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1986. – **98**. – P. 473–485.

[77] *Langer G. E., Hoffman R. E., Zaidins C. S.* Observational Constraints on the Origin of the Aluminum Enhancements and Magnesium Depletions in Bright M13 Giants // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1997. – **109**. – P. 244–251.

[78] *Lindblad B.* Spectrophotometric methods for determining stellar luminosity // Astrophys. J. – 1922. – **55**. – P. 85–118.

[79] *Malkan M. A.* Near Infrared Photometry of Globular Clusters Near the Galactic Center // Astrophys. param. glob. clust. IAU Coll. 68. – 1981. – P. 533.

[80] *Mayall N. U.* The Radial Velocities of Fifty Globular Star Clusters // Astrophys. J. – 1946. – **104**. – P. 290–323.

[81] *McClure R. D., van den Bergh S.* Five-color intermediate-band photometry of stars, clusters, and galaxies // Astron. J. – 1968. – **73**. – P. 313–337.

[82] *Messenger B. B.* Modelling of Na and Al globular cluster abundance anomalies using a simulated H shell instability // Mem. Soc. Astron. Ital. – 2001. – **72**. – P. 363–370.

[83] *Messier C.* Catalogue des nebuleuses et des amas d'etoiles // Connaissance des Temps, 1784, – 1850. – P. 227–269.

[84] *Mishenina T. V., Korotin S. A., Klochkova V. G., Panchuk V. E.* Oxygen abundances in halo Stars from O I Triplet // Astron. and Astrophys. – 2000. – **353**. – P. 978–986.

[85] *Mishenina T. V., Kovtyukh V. V.* Analysis of neutron capture elements in metal-poor stars // Astron. and Astrophys. – 2001. – **370**. – P. 951–966.

[86] *Mishenina T. V., Kovthyukh V. V., Soubiran C., et al.* Abundances of Cu and Zn in metal-poor stars: Clues for Galaxy evolution // Astron. and Astrophys. – 2002. – **396**. – P. 189–201.

[87] *Moehler S., Landsman W. B., Sweigart A. V., Grundahl F.* Hot HB stars in globular clusters – Physical parameters and consequences for theory. VI. The second parameter pair M3 and M13 // Astron. and Astrophys. – 2003. – **405**. – P. 135–148.

[88] *Mould J., Stutman D., McElroy D.* TiO band strengths in metal-rich globular clusters. II. // Astrophys. J. – 1979. – **228**. – P. 423–429.

[89] *Nissen P. E., Primas F., Asplund M., Lambert D. L.* O/Fe in metal-poor main sequence and subgiant stars // Astron. and Astrophys. – 2002. – **390**. – P. 235–251.

[90] *Norris J.* The ellipticities of globular clusters and the cyanogen problem // Astrophys. J. – 1987. – **313**. – P. L65–L68.

[91] *Norris J. E., Da Costa G. S.* The Giant Branch of omega Centauri. IV. Abundance Patterns Based on Echelle Spectra of 40 Red Giants // Astrophys. J. – 1995. – **447**. – P. 680–705.

[92] *Otsuki K., Honda S., Aoki W., et al.* Neutron-capture elements in the metal-poor globular cluster M15 // Astrophys. J. – 2006. – **641**, N 2. – P. L117–L120.

[93] *Pasquini L., Molaro P.* Lithium abundance in the globular cluster NGC 6397 // Astron. and Astrophys. – 1996. – **307**. – P. 761–767.

[94] *Pasquini L., Bonifacio P., Molaro P., et al.* Li in NGC 6752 and the formation of globular clusters // Astron. and Astrophys. – 2005. – **441**. – P. 549–553.

[95] *Pavlenko Y. V., Jones H. R. A., Longmore A. J.* Carbon abundances and 12C/13C from globular cluster giants // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2003. – **345**, N 1. – P. 311–324.

[96] *Pease F. G.* Spectra of Stars in the Hercules Cluster M13 // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1914. – **26**, N 155. – P. 204.

[97] *Pickering E. C., Bailey S. I.* Harvard College Observatory, circular N 18. Variable star clusters // Astrophys. J. – 1897. – **6**. – P. 258–259.

[98] *Pilachowski C., Sneden C., Freeland E., Casperson J.* Carbon isotope ratios for giants in globular cluster M3: the unique lithium-rich giant IV-101 // Astron. J. – 2003. – **125**. – P. 794–800.

[99] *Pilachowski C., Sneden C., Kraft R. P., et al.* A survey for enhanced lithium in 261 globular cluster giants // Astron. J. – 2000. – **119**, N 6. – P. 2895–2901.

[100] *Pilachowski C. A.* The abundance of oxygen in M92 giant stars // Astrophys. J. – 1988. – **326**. – P. L57–L60.

[101] *Pilachowski C. A., Sneden C., Kraft R. P.* Sodium Abundances in Field Metal-Poor Stars // Astron. J. – 1996. – **111**. – P. 1689–1704.

[102] *Pilachowski C. A., Sneden C., Wallerstein G.* The chemical composition of stars in globular clusters // Astrophys. J. Suppl. Ser.– 1983. – **52**. – P. 241–287.

[103] *Popper D. M.* Spectral Types of Stars in the Globular Clusters Messier 3 and Messier 13 // Astrophys. J. – 1947. – **105**. – P. 204–211.

[104] *Preston G. W.* A Spectroscopic Study of the RR Lyrae Stars // Astrophys. J. – 1959. – **130**. – P. 507–538.

[105] *Roman N. G.* A group of high velocity F-type stars // Astron. J. – 1954. – **59**. – P. 307–312.

[106] *Salaris M., Riello M., Cassisi S., Piotto G.* The initial helium abundance of the Galactic globular cluster system // Astron. and Astrophys. – 2004. – **420**. – P. 911–919.

[107] *Sandage A.* Results of a Pilot Program to Discover New Subdwarfs in the Solar Neighborhood // Astrophys. J. – 1964. – **139**. – P. 442–450.

[108] *Sandage A.* Main-sequence photometry, color-magnitude diagrams, and ages for the globular clusters M3, M13, M15, and M92 // Astrophys. J. – 1970. – **162**. – P. 841–870.

[109] *Sandage A., Wallerstein G.* Color-Magnitude Diagram for Disk Globular Cluster NGC 6356 Compared with Halo Clusters // Astrophys. J. – 1960. – **131**. – P. 598–609.

[110] *Sandage A., Smith L. L.* The color-magnitude diagram of the metal-rich globular cluster NGC 6712 // Astrophys. J. – 1966. – **144**, N 3. – P. 886–893.

[111] *Schwarzschild M., Schwarzschild B.* A Spectroscopic Comparison Between – and Low-Velocity F Dwarfs // Astrophys. J. – 1950. – **112**. – P. 248–265.

[112] *Searle L., Zinn R.* Compositions of halo clusters and the formation of the galactic halo // Astrophys. J. – 1978. – **225**. – P. 357–379.

[113] *Shapley H.* Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. VII. The distances, distribution in space, and dimensions of 69 globular clusters // Astrophys. J. – 1918. – **48**. – P. 154–181.

[114] *Shchukina N. G., Trujillo Bueno J., Asplund M.* The Impact of Non-LTE Effects and Granulation Inhomogeneities on the Derived Fe and O Abundances in Metal Poor Halo Stars // Astrophys. J. – 2005. – **618**, N 2. – P. 939–952.

[115] *Shetrone M. D.* Al, Mg and Eu Abundances in Globular Cluster Giants. I. Tests of Deep Mixing // Astron. J. – 1996. – **112**, N 4. – P. 1517–1535.

[116] *Shetrone M. D., Smith G. H., Briley M. M., et al.* CH, CN, and NH band strengths of metal-poor cluster and field red giants // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1999. – **111**. – P. 1115–1123.

[117] *Simmerer J., Sneden C., Ivans I. I., et al.* A Comparison of Copper Abundances in Globular Cluster and Halo Field Giant Stars // Astron. J. – 2003. – **125**, N 4. – P. 2018–2028.

[118] *Slipher V. M.* Spectrographic observations of star clusters (abstract) // Popular Astronomy. – 1918. – **26**. – P. 8.

[119] *Smith G. H., Briley M. M.* CN abundance inhomogeneities in the globular cluster Messier 13 (NGC 6205): results based on merged data sets from the literature // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2006. – **118**, N 843. – P. 740–753.

[120] *Smith G. H., Shetrone M. D., Briley M. M., et al.* CNO abundances of bright giants in the globular cluster M5 // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1997. – **109**. – P. 236–243.

[121] *Smith G. H., Fulbright J.* CN and CH Band Strengths of Bright Giants in the Globular Cluster M10 // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1997. – **109**. – P. 1246–1250.

[122] *Smith G. H., Norris J. E.* CN variations among AGB and HB stars in the M5, M4, and NGC 6752 // Astron. J. – 1993. – **105**, N 1. – P. 173–183.

[123] *Smith V. V., Shetrone M., Keane M. J.* Lithium in a Cool Red Giant Member of the Globular Cluster NGC 362 // Astrophys. J. – 1999. – **516**. – P. L73–L76.

[124] *Smith G. H.* CN abundance inhomogeneities in the globular cluster M3: results based on merged data sets from the literature // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2002. – **114**, N 800. – P. 1097–1107.

[125] *Sneden C., Pilachowski C. A., Kraft R. P.* Barium and sodium abundances in the globular clusters M15 and M92 // Astron. J. – 2000. – **120**. – P. 1351–1363.

[126] *Sneden C., Kraft R. P., Guhathakurta P., et al.* The chemical composition contrast between M3 and M13 revisited: new abundances for 28 giant stars in M3 // Astron. J. – 2004. – **127**. – P. 2162–2184.

[127] *Sobeck J. S., Ivans I. I., Simmerer J. A., et al.* Manganese abundances in cluster and field stars // Astron. J. – 2006. – **131**, N 6. – P. 2949–2958.

[128] *Spite F., Spite M.* Abundance of lithium in unevolved halo stars and old disk stars – Interpretation and consequences // Astron. and Astrophys. – 1982. – **115** – P. 357–366.

[129] *Suntzeff N. B.* Carbon and nitrogen abundances in the giant stars of the globular clusters M3 and M13 // Astrophys. J. Suppl. Ser.– 1981. – **47**. – P. 1–32.

[130] *Suntzeff N. B., Smith V. V.* Carbon isotopic abundances in giant stars in the CN-bimodal globular clusters NGC 6752 and M4 // Astrophys. J. – 1991. – **381**. – P. 160–172.

[131] *Sweigart A. V., Mengel J. G.* Meridional circulation and CNO anomalies in red giant stars // Astrophys. J. – 1979. – **229**. – P. 624–641.

[132] *Takeda Y.* Non-LTE effect on CNO abundance determination for solar-type stars: The Sun, Procyon, and the oxygen problem in metal-poor dwarfs // Publ. Astron. Soc. Japan. – 1994. – **46**, N 1. – P. 53–72.

[133] *Thévenin F., Charbonnel C., De Freitas Pacheco J. A., et al.* VLT observations of turnoff stars in the globular cluster NGC 6397 // Astron. and Astrophys. – 2001. – **373**. – P. 905–915.

[134] *Thévenin F., Idiart T. P.* Stellar iron abundances: non-LTE effects // Astrophys. J. – 1999. – **521**, N 2. – P. 753–763.

[135] *Thompson H. M. A., Keenan F. P., Dufton P. L., et al.* Iron abundances of B-type post-asymptotic giant branch stars in globular clusters: Barnard 29 in M13 and ROA 5701 in ω Cen // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2007. – **378**. – P. 1619–1632.

[136] *Thompson H. M. A., Keenan F. P., Dufton P. L., et al.* Iron abundances from optical Fe III absorption lines in B-type stellar spectra // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2008. – **383**, N 2. – P. 729–740.

[137] *Tomkin J., Bell R. A.* The iron, carbon and nitrogen abundances of the subdwarf Groombridge 1830 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1973. – **163**. – P. 117–127.

[138] *Vanture A. D., Wallerstein G., Brown J. A.* Abundances in three heavy-element stars in Omega Centauri // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1994. – **106**, N 702. – P. 835–842.

[139] *Wallerstein G., Helfer H. L.* Photometric methods for measuring the metal content of K giants // Astron. J. – 1966. – **71**. – P. 350–354.

[140] *Woosley S., Weaver T.* The Evolution and Explosion of Massive Stars. II. Explosive Hydrodynamics and Nucleosynthesis // Astrophys. J. Suppl. Ser.– 1995. – **101**. – P. 181–235.

[141] *Wrubel Marshal H.* Exact Curves of Growth for the Formation of Absorption Lines According to the Milne-Eddington Model. I. Total Flux // Astrophys. J. – 1949. – **109**. – P. 66–75.

[142] *Yong D., Lambert D. L., Paulson D. B., Carney B. W.* Rubidium and lead abundances in giant stars of the globular clusters M4 and M5 // Astrophys. J. – 2008. – **673**, N 2. – P. 854–863.

[143] *Yong D., Aoki W., Lambert D. L.* Mg isotope ratios in giant stars of the globular clusters M13 and M71 // Astrophys. J. – 2006. – **638**, N 2. – P. 1018–1027.

[144] *Zdanavicius K. V.* Integrated photometry of globular clusters in the Vilnius system // Astron. Zh. – 1983. – **60**. – P. 44–52.

[145] *Zinn R., West M. J.* The globular cluster system of the galaxy. III. Measurements of radial velocity and metallicity for 60 clusters and a compilation of metallicities for 121 clusters // Astrophys. J. Suppl. Ser.– 1984. – **55**. – P. 45–66.