

НЕРАЗРЕШЕННЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ С БЕЛЫМИ КАРЛИКАМИ В РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЯХ

© 2024 г. В. О. Михневич^{1,*}, А. Ф. Селезнев^{1,**}

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*E-mail: varvara.mikhnevich@urfu.ru

**E-mail: anton.seleznev@urfu.ru

Поступила в редакцию 27.12.2023 г.

После доработки 09.01.2024 г.

Принята в печать 29.01.2024 г.

Для девяти рассеянных скоплений исследовано возможное расположение на фотометрической диаграмме неразрешенных двойных систем, одним из компонентов которых является белый карлик (БК), а другим — звезда главной последовательности (ГП). Такие системы располагаются ниже и левее ГП. Количество звезд скопления, вероятно, проэволюционировавших в белые карлики, сравнивается с количеством кандидатов в неразрешенные двойные системы с БК. Показано, что количество вероятных членов скопления, лежащих под главной последовательностью, в основном меньше, чем ожидаемое количество белых карликов. Наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне позволяют обнаруживать БК и неразрешенные двойные системы БК + ГП увереннее, чем при наблюдениях в видимом диапазоне.

Ключевые слова: рассеянные звездные скопления, двойные системы, белые карлики

DOI: 10.31857/S0004629924020037 EDN: КТКМВФ

1. ВВЕДЕНИЕ

Белые карлики являются продуктом эволюции звезд малой и средней массы до $8M_{\odot}$ [1], составляющих большинство звезд в Галактике. Следовательно, белые карлики довольно распространены. Эволюция одиночного белого карлика ведет к его постепенному остыванию за счет излучения. При уменьшении температуры изменяется и цвет — от белого к красному. Если белый карлик входит в состав тесной двойной системы, возможен перенос вещества на БК со звезды-компаньона, иногда сопровождаемый стадией общей оболочки. Исследованию этой эволюционной стадии посвящено большое количество работ, предлагающих сценарии развития [2, 3] и моделирования процессов обмена веществом [4, 5, 6]. Эволюция двойной системы с переносом вещества на БК приводит к таким явлениям, как новые, сверхновые, катаклизмические переменные звезды, рентгеновские двойные системы, которые представляют фундаментальный астрофизический интерес. Особый интерес представляют вспышки сверхновых типа Ia, происходящие при накоплении белым карликом массы больше предела Чандрасекара.

Рассеянные звездные скопления (РЗС) все чаще привлекают внимание при поиске белых карликов. РЗС — это гравитационно-связанные группы звезд, родившихся в одном событии звездообразования и

имеющих в первом приближении близкие возраст, химсостав, пространственное движение и расстояние до наблюдателя. Белые карлики, являющиеся членами скопления, наследуют эти характеристики, что открывает дополнительные возможности в исследовании эволюции скопления и самих БК. Например, соотношение начальной и конечной масс (в английской литературе IFMR), связывающее конечную массу белого карлика и начальную массу звезды-прародителя [7, 8], позволит отследить общую потерю массы скоплением. В работе [9] замечено количество БК было обнаружено в звездном потоке в окрестности скопления Альфа Персея. Это стало одним из аргументов того, что поток представляет собой разрушенное старое звездное скопление. Однако астрономы испытывают трудности в исследованиях белых карликов в связи с их низкой яркостью. Из-за своих небольших размеров они являются довольно тусклыми объектами в видимом диапазоне (для более детального обзора см. [10, 11, 12]). Несмотря на значительное улучшение качества получаемых астрометрических данных, низкая яркость БК все еще представляет проблему при точном определении расстояний до них. Однако на основе каталогов Gaia [13] и спектроскопических исследований из SDSS [14] создаются каталоги, содержащие объекты, которые с некоторой вероятностью могут оказаться белыми карликами [15], а также списки белых карликов — вероятных членов рассеянных

скоплений [16, 17, 18]. При этом используются дополнительно фотометрические данные Pan-STARRS [19] и GALEX [20] для получения информации о массе предшественника и времени охлаждения БК. Но все это относится к одиночным звездам.

В наиболее проэволюционировавших и населенных рассеянных звездных скоплениях ожидается заметное количество белых карликов, в том числе и в двойных системах. Широко признано, что двойные системы являются очень распространенным явлением [21]. Наличие двойных и кратных систем более высокого порядка влияет на динамику и распределение звезд в скоплении. Динамическое взаимодействие приводит к диссипации звезд малой массы из скопления, а двойные и кратные звезды усиливают этот эффект. Знание свойств неразрешенных двойных и кратных систем в звездных скоплениях играет важную роль, в частности, в задачах построения функции светимости [22], начальной функции масс [23] и оценки массы скопления [24–26].

Для обнаружения неразрешенных двойных звезд применяют различные методы: от фотометрии до спектроскопии. Но для спектроскопических исследований требуется большое количество наблюдательного времени на крупных телескопах. Наиболее эффективный метод на сегодняшний день — высокоточная фотометрия. Мы располагаем данными для подобных исследований, благодаря программам обзоров всего неба в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, в том числе успешной работе космической миссии Gaia. Двойные звезды, оба компонента которых вносят вклад в общую яркость одного неразрешенного источника, имеют смещенное относительно одиночных звезд положение на диаграмме “звездная величина—показатель цвета” (CMD). Большое количество двойных расположено на более красной стороне главной последовательности. В Уральском федеральном университете ведется программа поиска неразрешенных двойных систем в рассеянных скоплениях [27, 28]. Но в этих работах рассматриваются только системы, оба компонента которых представляют собой звезды главной последовательности. Сочетание горячего белого карлика и холодной маломассивной звезды главной последовательности обеспечивает совершенно другие фотометрические характеристики неразрешенной двойной системы БК + ГП.

В этой работе мы рассмотрим такую комбинацию компонентов неразрешенной двойной системы. Раздел 2 посвящен описанию выборок вероятных членов РЗС. В разделе 3 мы исследуем природу членов рассеянного скопления, расположенных ниже

и левее главной последовательности на CMD. В разделе 4 продемонстрированы преимущества наблюдений в УФ-диапазоне. Выводы и их обсуждение представлены в разделе 5.

2. ВЫБОРКИ ВЕРОЯТНЫХ ЧЛЕНОВ СКОПЛЕНИЙ

Наличие белых карликов можно ожидать в скоплениях старше 30 млн лет, в которых наибольшая масса звезд главной последовательности меньше верхнего предела, равного $8M_{\odot}$ [1]. На рис. 1 показаны изохроны PARSEC [29] разных возрастов с солнечным содержанием металлов, черные точки — положение точек поворота ГП. Каждой точке соответствует масса звезды в единицах массы Солнца, указанная стрелочкой. Возраст обозначен полукруглым градиентом.

Изучение рассеянных скоплений всегда было осложнено их низкой плотностью и типичным расположением в диске Галактике. По этим причинам затруднительно выделить их члены среди звезд поля. В настоящее время известно около 2000 РЗС [30, 31], видимых в оптическом диапазоне, самые далекие из них расположены на расстоянии в несколько килопарсек. К сожалению, о полноте каталогов вероятных членов скоплений трудно говорить даже на расстояниях до 1 кпк. По меньшей мере, в выборки вероятных членов не попадают слабые звезды, в том числе и белые карлики. Но стоит принять во внимание и то, что последний масштабный поиск скоплений в Галактике на основе данных каталога Gaia DR3 показывает ~6000 звездных группировок на расстояниях до 12 кпк (см. каталог Хант и Рефферт [32]). Каталог содержит выборки вероятных членов этих звездных группировок и включает объекты вплоть до ~20 звездной величины. Это значительно увеличивает число известных членов скоплений по сравнению с предыдущими подобными работами. Однако сами авторы [32] предостерегают, что несколько тысяч отождествленных ими звездных группировок, скорее всего, являются гравитационно несвязанными движущимися группами, которые будут классифицированы в их следующей работе.

В нашей работе используются выборки из каталога [32] для хорошо известных скоплений: Alessi-Teutsch 8, NGC 1039, NGC 2301, NGC 2360, NGC 2516, NGC 3114, NGC 3532, NGC 6281, NGC 6475. Эти скопления имеют разное количество вероятных членов, а также достаточно выраженную главную последовательность на CMD. Возрасты этих скоплений лежат в диапазоне от 140 млн лет до 1 млрд лет, а их расстояния не превышают ~1 кпк согласно

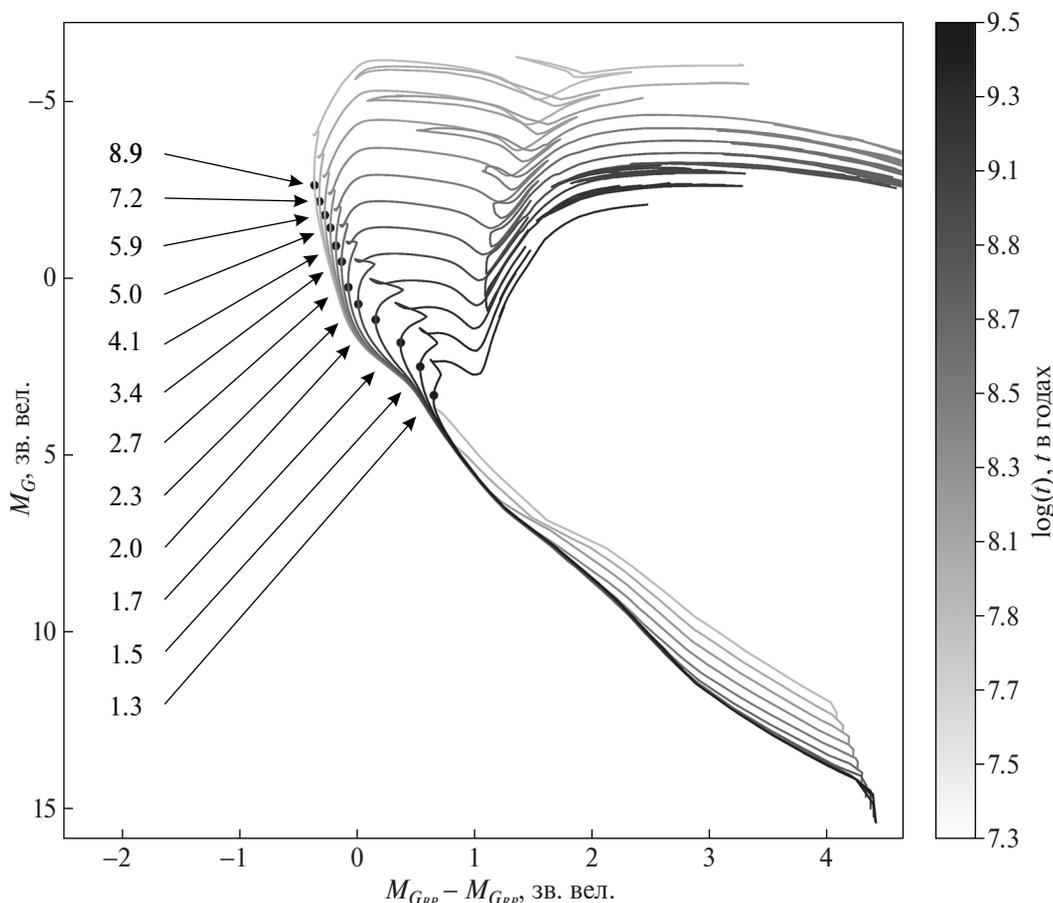


Рис. 1. Изохроны PARSEC с солнечным содержанием металлов и логарифмом возраста в годах от 7.3 до 9.5. На каждой изохроне черной точкой указано положение точки поворота. Масса звезды в единицах массы Солнца, соответствующей точке поворота, указана стрелочкой. Возраст обозначен полутоновым градиентом.

каталогу [31]. Мы используем только объекты с вероятностью принадлежности к скоплению $p > 50\%$.

3. ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ С БЕЛЫМИ КАРЛИКАМИ В РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЯХ

Для белых карликов, содержащихся в рассеянных скоплениях, мы знаем расстояния, поглощения и возрасты. Изучение белых карликов в контексте их родительских РЗС позволяет определить свойства предшественников этих БК, а также изучить соотношение начальной/конечной массы (IFMR) [7, 8, 33, 34]. В случае разрешенных двойных систем положение компонента — белого карлика на диаграмме “звездная величина—показатель цвета” не отличалось бы от положения одиночной звезды. Но выборки вероятных членов скоплений содержат объекты, лежащие на CMD немного ниже главной последовательности. Эти объекты предположительно могут являться неразрешенными двойными системами с БК в качестве одного из компонентов.

Недавно были опубликованы списки ранее не ассоциированных со скоплениями белых карликов [18]. Поиски осуществлялись посредством метода HDBSCAN — кластеризации астрометрических параметров с дальнейшим анализом их фотометрических характеристик. Мы смоделировали неразрешенные БК + ГП системы на основе фотометрических данных этих БК и избранных звезд ГП скопления NGC 3532. Чтобы вычислить звездные величины неразрешенных систем, был использован подход, примененный в работе Малофеевой с соавторами [27]. С помощью формулы Погсона мы получили следующее выражение:

$$m_{\text{БК+ГП}} = m_{\text{БК}} - 2.5 \lg(1 + 10^{-0.4(m_{\text{ГП}} - m_{\text{БК}})}), \quad (1)$$

где $m_{\text{БК}}$ — звездная величина БК, $m_{\text{ГП}}$ — звездная величина звезды ГП, а $m_{\text{БК+ГП}}$ — звездная величина неразрешенной двойной системы. На рис. 2 показана диаграмма скопления NGC 3532 в фотометрической системе Gaia. Серыми точкам обозначены члены выборки с вероятностью принадлежности к скоплению $>50\%$ [32]. Черными звездочками ука-

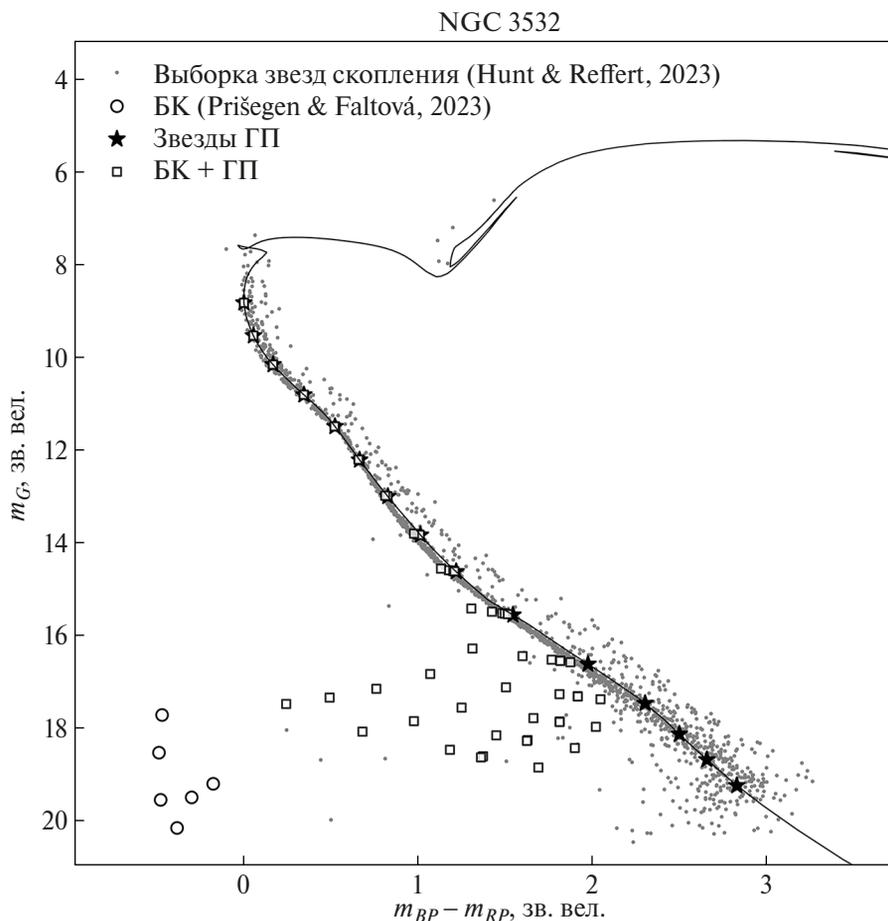


Рис. 2. CMD-скопления NGC 3532 в фотометрической системе Gaia. Сплошной черной линией проведена изохрона PARSEC [29], наилучшим образом соответствующая последовательности скопления. Точками показаны звезды скопления согласно данным [32]. Черными звездочками обозначены избранные звезды ГП. Открытыми кружками указаны ассоциированные со скоплением БК [18], квадратами — смоделированные неразрешенные двойные системы, состоящие из БК и звезды ГП.

заны избранные звезды ГП, с которыми комбинировались ассоциированные со скоплением белые карлики, которые, в свою очередь, указаны открытыми кружками. Неразрешенные двойные системы с белыми карликами показаны квадратами. Из рис. 2 видно, что в случае сочетания БК с более горячей звездой ГП двойная система очень мало отличается от звезд главной последовательности.

Предположим, что объекты, находящиеся под главной последовательностью, это неразрешенные двойные системы. Тогда, используя избранные звезды главной последовательности в качестве одного из компонентов, мы можем рассчитать положение на CMD второго компонента этих систем, применяя ту же методику. На рис. 3 рассчитанные для всех комбинаций вторые компоненты обозначены открытыми кружками. Область, занимаемая белыми карликами, согласно работе [15], отделена

штриховой линией. Многие из них имеют звездные величины на грани обнаружения Gaia. Поэтому такие белые карлики не могли бы попасть в выборку [18]. Кроме того, возможно, что часть точек, расположенных под главной последовательностью, — результат ошибок метода отбора вероятных членов.

Возникает вопрос, действительно ли все объекты, обозначенные квадратами на рис. 3, могут быть неразрешенными БК + ГП системами? Чтобы разобраться в этом, сравним количество кандидатов в БК + ГП системы с количеством звезд, которые могли проэволюционировать в белые карлики за время жизни скопления. Количество кандидатов в БК + ГП системы $N_{БК+ГП}$ мы определяем как количество звезд под главной последовательностью (квадраты на рис. 3), для которых можно составить хотя бы одну комбинацию из звезды ГП и БК. Для

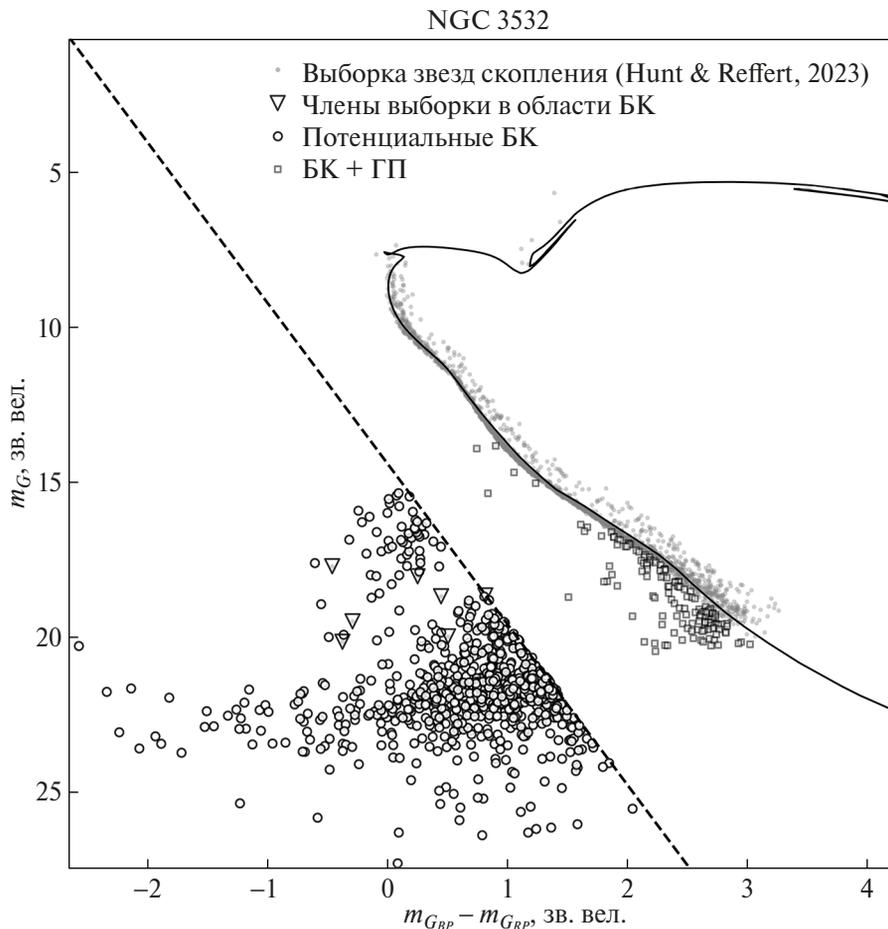


Рис. 3. CMD-скопления NGC 3532 в фотометрической системе Gaia. Сплошной черной линией проведена изохрона PARSEC, штриховой линией — граница области, занимаемой белыми карликами, согласно работе [15]. Точками показаны звезды скопления согласно данным [32]. Квадратами обозначены предположительно неразрешенные БК + ГП системы — члены скопления, лежащие под главной последовательностью. Открытыми кружками указаны оценки звездных величин БК, получившиеся при всех возможных значениях $m_{\text{ГП}}$ в системе БК + ГП. Треугольники — члены скопления, попадающие в область БК.

оценки числа проэволюционировавших объектов $N_{\text{эвол}}$ мы использовали функцию масс Солпитера:

$$N_{\text{эвол}} = N_{\text{ГП}} \frac{\int_{m_{\text{ГП}}}^8 m^{-2.35} dm}{\int_{m_{\text{min}}} m^{-2.35} dm}, \quad (2)$$

где $N_{\text{ГП}}$ — оценка числа звезд скопления, лежащих до точки поворота, включая звезды ГП и неразрешенные двойные системы, лежащие выше ГП [27, 28] (рис. 4, левая панель); $m_{\text{ГП}}$ — масса одиночной звезды у точки поворота. Такое сравнение было проведено для всех девяти РЗС.

На правой панели рис. 4 показано соотношение относительного количества проэволюционировавших в белые карлики объектов с относительным

количеством возможных неразрешенных двойных систем с белым карликом (по отношению к общему числу звезд в скоплении $N_{\text{общ}}$). Если бы все квадраты на рис. 3 были неразрешенными БК + ГП системами и мы бы видели все белые карлики в скоплении, то на правой панели рис. 4 мы получили бы линейную зависимость. Однако мы видим, что для большинства скоплений $N_{\text{БК+ГП}}$ меньше, чем число БК, которые могли возникнуть в результате эволюции. Это может свидетельствовать о том, что выборки вероятных членов неполны, так как возможности обнаружения таких слабых объектов ограничены. В трех скоплениях, напротив, $N_{\text{БК+ГП}}$ превосходит $N_{\text{эвол}}$. Следовательно, не все квадраты на рис. 3 в этих трех скоплениях можно объяснить неразрешенной двойной системой с белым карликом. Учет возможных одиночных белых карликов из выборок [32] не влияет на результат на правой панели рис. 4.

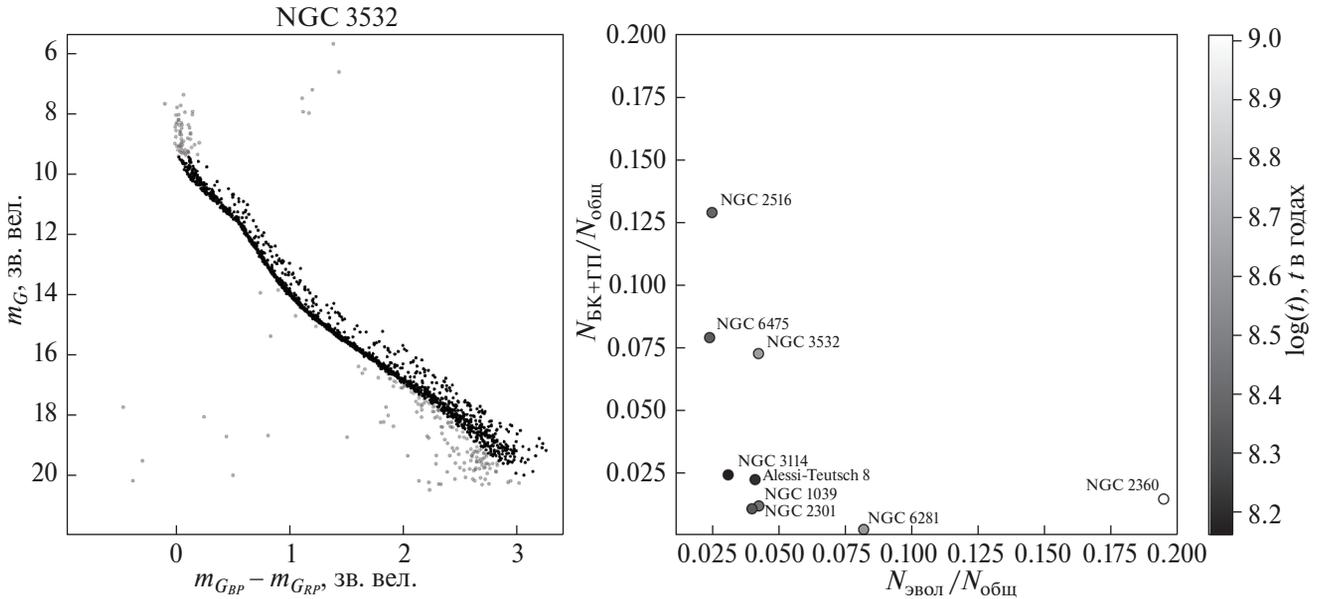


Рис. 4. Слева — диаграмма “звездная величина—показатель цвета” выборки скопления NGC 3532 в фотометрической системе Gaia [32]. Справа — соотношение содержания проэволюционировавших в БК объектов $N_{\text{эвол}}/N_{\text{общ}}$ и содержания двойных систем с белым карликом $N_{\text{БК+ГП}}/N_{\text{общ}}$; градиент показывает возраст рассматриваемых скоплений.

4. ПОИСКИ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЙ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ

При наблюдениях в оптическом диапазоне белые карлики очень слабые и видны только в ближайших рассеянных скоплениях. Наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне (УФ) могут помочь при исследовании населения белых карликов в скоплениях. Имеется обширная литература по наблюдениям шаровых скоплений в УФ на телескопе им. Хаббла. Рассмотрим результаты исследования шарового скопления 47 Тукана [35, 36]. Это одно из ближайших к Солнцу шаровых скоплений. На диаграмме “звездная величина—показатель цвета” в полосах F225W и F336W в работах [35, 36] показано, что яркие белые карлики и яркие голубые бродяги являются абсолютно самыми яркими звездами этого скопления.

На основе данных о звездных величинах и показателях цвета белых карликов в ультрафиолетовом диапазоне [35] мы вычислили абсолютные звездные величины этих звезд. Для этого использовались параметры шарового скопления 47 Тус: избыток цвета $E(B - V) = 0.04$ из [37] и гелиоцентрическое расстояние 4.45 ± 0.12 кпк из работы [38]. Для расчета полного поглощения в полосах F225W и F336W использовались формулы со страницы ввода параметров для запроса треков и изохрон PARSEC (полосы камеры WFC3 телескопа Хаббла):

$$A_\lambda = A_V \cdot C_\lambda,$$

где индекс λ обозначает используемую фотометрическую полосу; $C_{\text{F225W}} = 2.62940$, $C_{\text{F336W}} = 1.67536$.

Далее абсолютные звездные величины белых карликов были использованы для расчета положения неразрешенных двойных систем на CMD типичного рассеянного скопления в ультрафиолетовом диапазоне. На рис. 5 открытыми кружками изображены избранные белые карлики, звездочками на изохроне — звезды главной последовательности. Квадратами обозначены все возможные комбинации избранных белых карликов и звезд главной последовательности. Следует отметить, что на диаграмме “звездная величина—показатель цвета” в ультрафиолетовых полосах неразрешенные двойные системы с БК расположены несколько дальше от главной последовательности, чем на диаграмме в полосах видимого диапазона. Это объясняется тем, что в ультрафиолетовом диапазоне белые карлики являются значительно более яркими, чем в видимом.

Население белых карликов может быть исследовано с помощью космической обсерватории Спектр-УФ¹ (краткий обзор проекта см. в [39]), чей запуск планируется в 2029 г. [40]. Телескоп Спектр-УФ планируется оснастить фильтрами F255W и F336W. Полосы F225W и F255W имеют ширину около 500 Å и сильно перекрываются, поэтому результаты

¹ <https://www.laspace.ru/ru/activities/projects/spectrum-uv/>

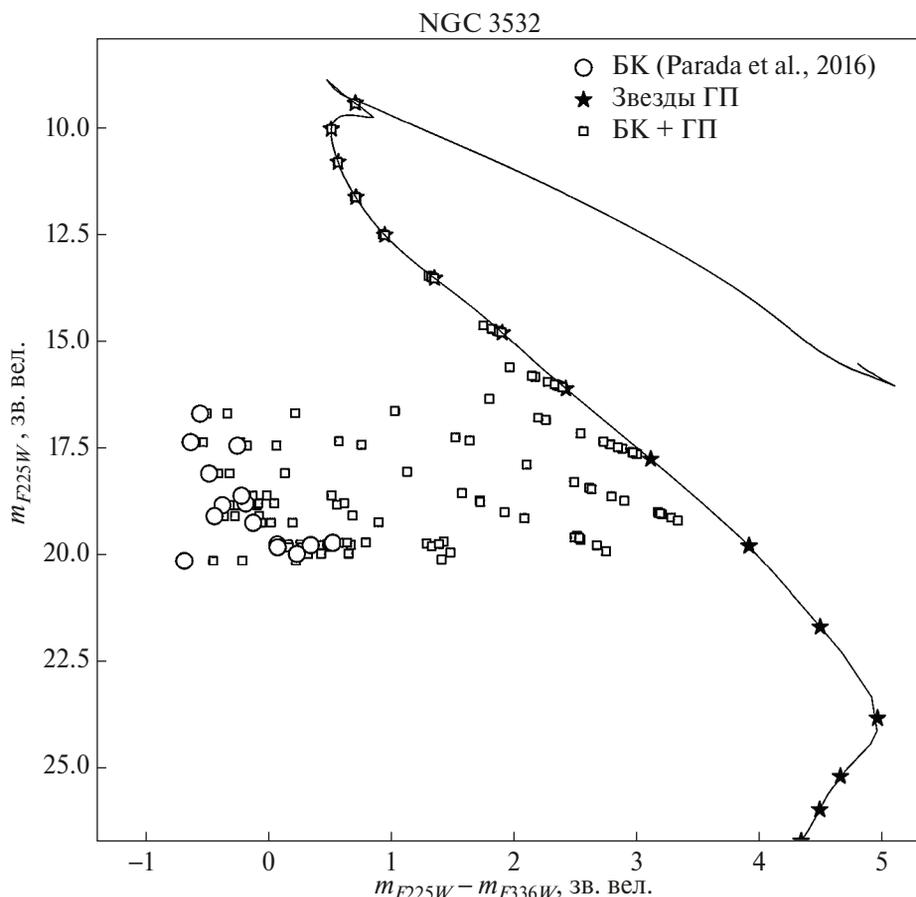


Рис. 5. CMD-скопления NGC 3532 в УФ-полосах фотометрической системы телескопа им. Хаббла. Сплошной черной линией проведена изохрона PARSEC. Черными звездочками обозначены избранные звезды ГП. Открытыми кружками указаны избранные БК из работы [35]. Квадратами указаны смоделированные неразрешенные двойные системы, состоящие из БК и звезды ГП.

наблюдения в полосе F255W не должны сильно отличаться от результатов телескопа Хаббла. Наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне также позволят обнаруживать неразрешенные двойные системы, в которых одним из компонентов является белый карлик, увереннее, чем при наблюдениях в видимом диапазоне.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было исследовано девять рассеянных звездных скоплений на возможное присутствие в них неразрешенных двойных систем, состоящих из звезды главной последовательности и белого карлика. Мы провели моделирование неразрешенных систем, включающих белые карлики, ассоциированные со скоплениями согласно [18], и избранные звезды главной последовательности. В результате мы показали, что такие системы располагаются ниже и левее главной последовательности на фотометрической диаграмме скопления в видимом диапазоне. В результате решения обратной задачи — моделирования компонентов-белых карликов — установлено,

что теоретически каждая звезда под ГП может представлять из себя неразрешенную БК + ГП систему.

Количественные оценки звезд, ожидаемо проэволюционировавших в белые карлики за время жизни скопления (опираясь на функцию масс Солпитера), в основном превышают количество кандидатов в неразрешенные двойные системы БК + ГП в скоплении. Это объясняется тем, что в выборки вероятных членов скопления, скорее всего, не попадают такие тусклые объекты. Звездные величины многих смоделированных белых карликов лежат на грани и за пределами возможностей обнаружения Gaia, на основе каталогов которой были построены выборки вероятных членов скоплений [32], а также списки ассоциированных со скоплениями белых карликов [18]. Однако в трех РЗС количество проэволюционировавших объектов меньше, чем количество кандидатов в неразрешенные БК + ГП системы. В подобных скоплениях не все источники под ГП на CMD можно объяснить таким образом. Альтернативным объяснением может быть изначально большее число массивных звезд в скоплении, чем

предсказывает функция масс Солпитера. Неразрешенные БК + ГП системы необходимо учитывать при получении оценок общего числа двойных звезд в скоплении [27, 28].

Рассмотрены возможности, которые открывают наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне для исследования населения белых карликов в рассеянных звездных скоплениях. Белые карлики в ультрафиолетовом диапазоне намного ярче, чем в видимом. Мы опирались на данные наблюдений телескопа им. Хаббла в полосах F225W и F336W и показали, что наблюдения в УФ позволяют обнаруживать БК и неразрешенные двойные системы БК + ГП увереннее, чем при наблюдениях в видимом диапазоне. Для этой задачи предлагается использовать готовящуюся к запуску в 2029 г. космическую обсерваторию Спектр-УФ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2023-0019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M. Limongi, L. Roberti, A. Chieffi, and K. Nomoto*, *Astrophys. J. Suppl.* **270**, 29 (2024).
2. *I. Iben and M. Livio*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **105**, 1373 (1993).
3. *K. A. Postnov and L. R. Yungelson*, *Liv. Rev. Relativity* **17**, 3 (2014).
4. *M. Livio and N. Soker*, *Astrophys. J.* **329**, 764 (1988).
5. *T. M. Tauris, D. Sanyal, S.-C. Yoon, and N. Langer*, *Astron. and Astrophys.* **558**, id. A39 (2013).
6. *F. K. Röpkke and O. de Marco*, *Liv. Rev. Computational Astrophys.* **9**(1), id. 2 (2023).
7. *J. D. Cummings, J. S. Kalirai, P.-E. Tremblay, E. Ramirez-Ruiz, and J. Choi*, *Astrophys. J.* **866**(1), id. 21 (2018).
8. *L. Ferrario, D. Wickramasinghe, J. Liebert, K. A. Williams*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **361**(4), 1131 (2005).
9. *V.V. Nikiforova, M.V. Kulesh, A.F. Seleznev, and G. Carraro*, *Astron. J.* **160**(3), id. 142 (2020).
10. *J. Liebert*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **18**, 363 (1980).
11. *D. Koester and G. Chanmugam*, *Reports Progress Phys.* **53**, 837 (1990).
12. *L. G. Althaus, A. H. Corsico, J. Isern, and E. Garcia-Berro*, *Astron. and Astrophys. Rev.* **18**(4), 471 (2010).
13. *T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016).
14. [*R. Ahumada, C. Allende Prieto, A. Almeida, F. Anders, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **249**(1), id. 3 (2020).
15. *N. P. Gentile Fusillo, P.-E. Tremblay, E. Cukanovaite, A. Vorontseva, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **508**(3), 3877 (2021).
16. *H. B. Richer, I. Caiazzo, H. Du, S. Grondin, et al.*, *Astrophys. J.* **912**(2), id. 165 (2021).
17. *M. Prišegen, M. Piecka, N. Faltová, N., M. Kajan, and E. Paunzen*, *Astron. and Astrophys.* **645**, id. A13 (2021).
18. *M. Prišegen and N. Faltová*, *Astron. and Astrophys.* **678**, id. A20 (2023).
19. *H.A. Flewelling, E.A. Magnier, K.C. Chambers, J.N. Heasley, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **251**(1), id. 7 (2020).
20. *L. Bianchi, B. Shiao, and D. Thilker*, *Astrophys. J. Suppl.* **230**(2), id. 24 (2017).
21. *G. Duchéne and A. Kraus*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **51**(1), 269 (2013).
22. *A. E. Piskunov and O. Yu. Malkov*, *Astron. and Astrophys.* **247**, 87 (1991).
23. *R. de Grijs, S. P. Goodwin, M. B. N. Kouwenhoven, and P. Kroupa*, *Astron. and Astrophys.* **492**(3), 685 (2008).
24. *P. Kroupa, C. A. Tout, and G. Gilmore*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **251**, 293 (1991).
25. *O.I. Borodina, A.F. Seleznev, G. Carraro, and V.M. Danilov*, *Astrophys. J.* **874**, id. 127 (2019).
26. *O.I. Borodina, G. Carraro, A.F. Seleznev, and V.M. Danilov*, *Astrophys. J.* **908**(1), id. 60 (2021).
27. *A. A. Malofeeva, A. F. Seleznev, and G. Carraro*, *Astron. J.* **163**(3), id. 113 (2022).
28. *A. A. Malofeeva, V. O. Mikhnevich, G. Carraro, G., and A. F. Seleznev*, *Astron. J.* **165**(2), id. 45 (2023).
29. *A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **427**, 127 (2012).
30. *T. Cantat-Gaudin, F. Anders, A. Castro-Ginard, C. Jordi, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **640**, id. A1 (2020).
31. *W. S. Dias, H. Monteiro, A. Moitinho, J. R. D. Lepine, G. Carraro, E. Paunzen, B. Alessi, and L. Villela*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **504**, 356 (2021).
32. *E. L. Hunt and S. Reffert*, *Astron. and Astrophys.* **673**, id. A114 (2023).
33. *P. Marigo, J. D. Cummings, J. L. Curtis, J. Kalirai, et al.*, *Nature Astron.* **4**, 1102 (2020).
34. *P.D. Dobbie, R. Napiwotzki, M.R. Burleigh, K.A. Williams, R. Sharp, M. A. Barstow, S. L. Casewell, and I. Hubeny*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **395**, 2248 (2009).
35. *J. Parada, H. Richer, J. Heyl, J. Kalirai, and R. Goldsbury*, *Astrophys. J.* **826**(1), id. 88 (2016).
36. *J. Parada, H. Richer, J. Heyl, J. Kalirai, and R. Goldsbury*, *Astrophys. J.* **830**(2), id. 139 (2016).
37. *P. A. Bergbusch and P. B. Stetson*, *Astron. J.* **138**, 1455 (2009).
38. *S. Chen, H. Richer, I. Caiazzo, and J. Heyl*, *Astrophys. J.* **867**(2), id. 132 (2018).
39. *Б. М. Шустов, М. Е. Сачков, А. А. Боярчук*, *Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина* **5**, 4 (2014).
40. *А. Ф. Селезнев и В. О. Михневич*, *Научные труды Института астрономии РАН* **8**(5), 241 (2023).

UNRESOLVED BINARY SYSTEMS WITH WHITE DWARFS IN OPEN STAR CLUSTERS

V. O. Mikhnevich^a, A. F. Seleznev^a

^aUral Federal University, Ekaterinburg, Russia

We investigate unresolved binary systems with components of main sequence star (MS) and white dwarf (WD) in nine open clusters. These systems are located below and to the left of the main sequence at the colour-magnitude diagram. We compare the number of cluster stars, which have likely evolved into white dwarfs, with the number of candidates for unresolved binary systems with WD. The number of probable cluster members, lying below the main sequence, is generally less than the expected number of white dwarfs. The observations in the ultraviolet could detect WDs and unresolved binary WD+MS systems more confidently than the observations in the visible range.

Keywords: open star clusters, binary systems, white dwarfs