

Spatial structure of some globular and open star clusters: I. Results of the investigations*

Zvezdelin I. Peykov¹, Rouscho M. Roussev²

¹ University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia

² „St. Kliment Ohridski“ University of Sofia, Department of Astronomy

E-mail: peykov_fhe@uacg.bg

(Research report. Accepted on 02.08.2007)

Abstract. The article presents the general conclusions of our program for investigation of the deep spatial structure of seven globular (M56, M12, NGC6535, NGC6171, NGC5466, M92 and M15) and four open (Pleiades, Praesepe, Coma Berenices and NGC2420) clusters on our Galaxy. The investigation of the globular clusters is carried out on deep plates of the 2/16 m RCC telescope of the Rozhen National Astronomical Observatory within the field of view 60' x 60'. Open clusters are investigated by data from the literature. The spatial structure of different subsystems in the clusters which contain stars over, around and under the main sequence turnoff in the (V, B-V) diagram is investigated based on the analysis of the differential and integral functions of distribution of the surface ($\Delta F(r)$ and $F(r)$) and spatial ($\Delta f(r)$ and $f(r)$) star density in the clusters obtained by the method of star counts carried out in different intervals ΔB , ΔV and up to different limit B and V magnitudes. It is shown that: (1) Different spatial zones distinguished by their gradient of star density have been observed in the structure of all clusters (globular and open). (2) The spatial structure has in general a layered character where the different layers coincide with the observed spatial zones. (3) The spatial structure of all clusters varies systematically as we proceed to fainter stars. This variation starts from the brightest stars of the main sequence and consist of the following: a homologous increase of the radii of each spatial zone of the cluster and of the cluster as a whole in accordance with a uniform law, and changes in the stellar density distribution - the rate of increase in the number of faint stars with increase in star magnitude grows as we move outwards in the cluster. General parameters defining the structure of the cluster are introduced and empirical relationships describing the variation of the structure are derived.

Key words: star cluster - structure

Пространствена структура на някои сферични и разсеяни звездни купове: I. Резултати от изследванията

Звезделин И. Пейков, Русчо М. Русев

Представени са основните резултати от нашата програма за изследване на дълбоката пространствена структура на седем сферични (M56, M12, NGC6535, NGC6171, NGC5466, M92 и M15) и четири разсеяни (Плеяди, Ясли, Косите на Вероника и NGC2420) звездни купа в нашата Галактика. Изследването на сферичните купове е проведено по дълбоки плаки от 2/16 м RCC телескоп на Националната астрономическа обсерватории - Рожен, с размер на полето 60' x 60'. Разсеяните купове са изследвани по данни от литературата. На основата на анализа на диференциалните и интегралните функции на разпределение на видимата ($\Delta F(r)$ и $F(r)$) и пространствена ($\Delta f(r)$ и $f(r)$) звездна плътност в куповете, получени посредством метода на звездните преброявания в различни интервали ΔB и ΔV и до различни пределни B и V величини, е изследвана пространствената структура на различни подсистеми от куповете, които обхващат звезди до, около и под точката на обръщане на главната последователност на диаграмата (V, B-V). Показано е, че: (1) В структурата на всички купове (сферични и разсеяни) се наблюдават различни пространствени зони, отличаващи се една от друга по своя градиент на плътността. (2) Пространствената структура притежава предимно слоист характер, където отделните слоеве съвпадат с наблюдаваните пространствени зони. (3) Пространствената структура на всички купове систематически се изменя с прехода към по-слабите звезди. Това изменение започва от най-ярките звезди на главната последователност и се извършва в две направления: хомологично нарастване на радиусите на пространствените зони и радиуса на купа по единен закон и изменение на разпределението на звездната плътност в куповете – с прехода към по-външните зони на купа нараства скоростта на увеличение на броя на слабите звезди с увеличаването на звездната величина. Изведени са

* Based on observations obtained at the Rozhen National Astronomical Observatory, operated by the Institute of Astronomy of the Bulgarian Academy of Sciences.

така също и общи параметри, определящи структурата на куповете и са получени эмпирически зависимости, описващи нейното изменение.

Пространственная структура некоторых шаровых и рассеянных скоплений: I. Результаты исследований

Звезделин И. Пейков, Русчо М. Русев

Приведены обобщенные результаты нашей программы по исследованию глубокой пространственной структуры семи шаровых (M56, M12, NGC6535, NGC6171, NGC5466, M92 и M15) и четырех рассеянных (Плеяды, Ясли, Волосы Вероники и NGC2420) скоплений нашей Галактики. Исследование шаровых скоплений проведено по глубоким пластинкам 2/16 м RCC телескопа Национальной Астрономической Обсерватории на г. Рожен с полем зрения 60' x 60'. Рассеянные скопления исследованы по данным из литературы. На основе анализа дифференциальных и интегральных функций распределения видимой ($\Delta F(r)$ и $F(r)$) и пространственной ($\Delta f(r)$ и $f(r)$) плотности звезд в скоплениях, полученных методом звездных подсчетов в разных интервалах ΔB , ΔV и до разных предельных B и V величин, выявлена пространственная структура разных подсистем скоплений, которые охватывают звезды до, около и ниже точки поворота главной последовательности на диаграмме (V , $B-V$). Показано, что: (1) В структуре всех скоплений (шаровых и рассеянных) наблюдаются различные пространственные зоны, отличающиеся одна от другой своим градиентом плотности. (2) Пространственная структура имеет преимущественно слоистый характер, где отдельные слои совпадают с наблюдаемыми пространственными зонами. (3) Пространственная структура всех скоплений систематически изменяется по мере перехода к более слабым звездам. Это изменение начинается с самых ярких звезд главной последовательности и происходит в двух направлениях: гомологическое нарастание радиусов пространственных зон и радиуса скопления по единому закону и изменение распределения звездной плотности в скоплениях – по мере перехода к более внешним зонам скопления скорость увеличения числа слабых звезд с увеличением звездной величины нарастает. Введены также общие параметры, определяющие структуру скоплений и получены эмпирические зависимости, описывающие ее изменение.

1 Введение

В цикле из трех статей мы представляем обобщенные результаты нашей более десятилетней программы по исследованию и сравнению глубокой пространственной структуры выбранных звездных скоплений (шаровых и рассеянных) нашей Галактики. В известном смысле она является продолжением программы Холопова и Артюхиной (см. напр. Холопова, 1981) по исследованию структуры скоплений, которая привела к открытию пространственных зон скоплений и их корон.

В данной работе приведены общие результаты из исследований глубокой пространственной структуры семи шаровых и четырех рассеянных скоплений, которые получены по единой методике на основе анализа дифференциальных и интегральных кривых распределения поверхностной ($\Delta F(r)$ и $F(r)$) и пространственной ($\Delta f(r)$ и $f(r)$) плотности звезд в скоплениях. Эти кривые получены методом звездных подсчетов в разных интервалах ΔB и ΔV и до разных предельных B и V величин. Они охватывают звезды разных подсистем скоплений, достигающих до, около и ниже точки поворота главной последовательности (ГП) на диаграмме (V , $B-V$) этих объектов.

2 Выбор исследуемых скоплений и их подсистем

Основное количество исследуемых объектов является шаровыми скоплениями. Их выбор определялся следующими критериями:

1. Возможный наибольший класс концентрации СС по Шепли-Сойер с целью проведения звездных подсчетов по возможности ближе к центру скопления.

2. Близкие к Солнцу скопления, имеющие наименьший видимый модуль расстояния $Mod \frac{V}{app}$, чтобы охватить подсчетами их предельно слабые звезды.
3. Различные по обилию металлов скопления, имеющие разные значения параметра $\left[\frac{m}{H}\right]$, с целью сравнения полученных результатов с этим параметром.
4. Скопления, имеющие различные угловые расстояния от галактического экватора (разные галактические широты b), с целью исследования влияния разной плотности звездного фона на наблюдаемую структуру этих объектов.

На основе этих критериев при помощи каталога Кукаркина (1974) и каталога Alcaïno (1979) были выбраны семь скоплений: M56, M12, NGC6535, NGC6171, NGC 5466, M92 и M15 из которых первые пять слабо изучены в структурном отношении до больших предельных величин. Последние две скопления более сконцентрированы и включены в программу с целью исследования влияния видимой концентрации звезд в скоплении на его структурные параметры. Общие данные для всех скоплений можно найти в указанных каталогах.

Многие авторы (в том числе и Холопов, 1981) считают, что в структурном, динамическом и эволюционном отношении шаровые и рассеянные скопления различаются между собой только массами (числом звезд) и возрастом этих объектов, т.е. существует единство в строении и, вероятно, в способе их возникновения. Поэтому мы включили в исследования с целью сравнения с шаровыми скоплениями и четыре рассеянных скопления: Плеяды, Ясли, Волосы Вероники и NGC2420, которые различаются по своим возрастам и виду их диаграмм (V, B-V). Кроме того в литературе для этих скоплений мы нашли достаточное количество данных для кривых $F(r)$ и $f(r)$, полученных по используемой нами методике до больших предельных звездных величин.

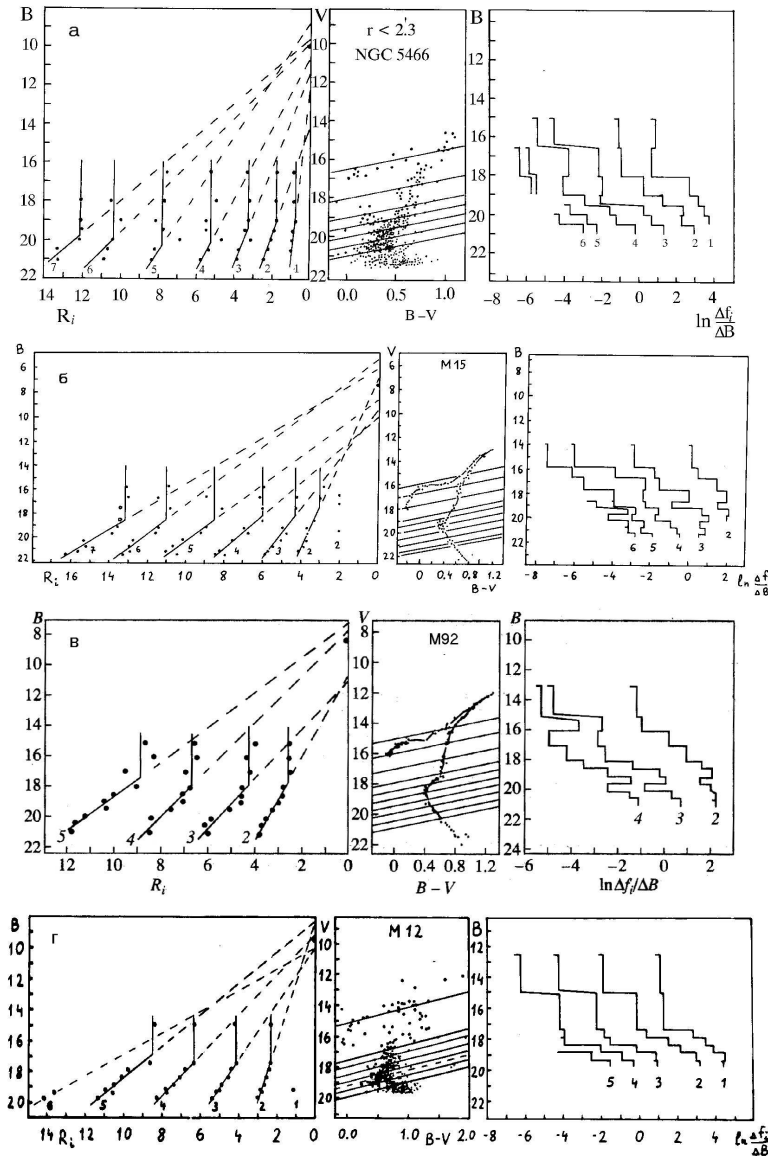
Выбор исследуемых в структурном отношении подсистем звезд рассматриваемых скоплений определялся следующими критериями:

1. Статистические. Для подсистем ярких звезд (красных гигантов RG, горизонтальной ветви HB, и части субгигантов SG) ширина интервалов звездных величин ΔB или ΔV , охваченных подсчетами звезд, определялась минимальным числом звезд, достаточным для полноты статистики при получении кривых $F(r)$. Для ярких звезд эти интервалы шире чем соответствующие для слабых звезд.
2. Фотометрические. Минимальная ширина интервалов для большинства слабых звезд (которые достаточно многочисленны) определялась величиной ошибки фотометрии.
3. Физические. Желательно производить выделение разных подсистем скопления на основе физических характеристик звезд, используя приведенные на рис. 1 и рис. 2 диаграммы (V, B-V). К сожалению, у нас не было в распоряжении двухцветной (B, V) фотометрии (за исключением NGC2420) и не была возможность для полного выделения звезд разных физических подсистем по их показателям цвета.

На основе всех этих критериев были выделены следующие подсистемы звезд рассматриваемых скоплений: самые яркие красные звезды выше горизонтальной ветви (RG), звезды горизонтальной ветви (HB) с примесью звезд ветви субгигантов (SG), звезды ветви (SG), звезды переходной области между ветвью субгигантов и точкой поворота ГП, звезды около точки поворота и звезды ниже точки поворота. Все интервалы и предельные звездные величины указаны прямыми линиями на диаграммах (V, B-V) исследуемых скоплений (рис. 1 – 4).

3 Используемый материал и его обработка

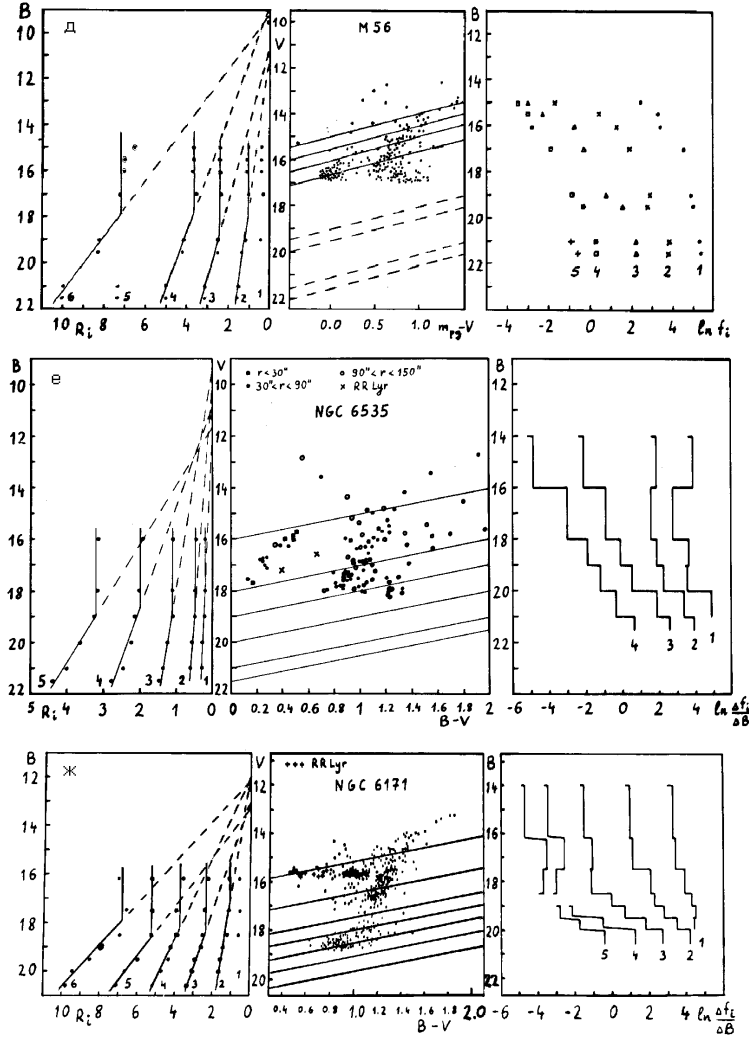
В течение нескольких лет нами получен ряд фотографических пластинок (в системе В) семи выбранных шаровых скоплений до больших предельных звездных величин. Они получены в фокусе Риччи-Кретьена ($F=16m$) двухметрового зеркального телескопа Национальной астрономической обсерватории Болгарии при максимально



Фиг. 1. Иллюстрация основных результатов по исследованию структуры рассматриваемых шаровых скоплений NGC5466, M15, M92 и M12

благоприятных условиях наблюдений и хорошем качестве изображений. Размер поля пластинок составляет $60' \times 60'$, масштаб - $13''/\text{mm}$, а предельная величина звездных подсчетов составляет около 21^m . Данные о пластинках можно найти в работах Пейкова, Русева (1988a, 1988b, 1990, 1999a, 1999b), Русева, Пейкова (1986) и Пейкова, Кадийской (2002).

Кроме этого наблюдательного материала, были использованы каталог Kustner (1920) для M56, каталог Рараго (1982) для NGC2420 и опубликованные кривые



Фиг. 2. Иллюстрация основных результатов по исследованию структуры рассматриваемых шаровых скоплений M56, NGC6535 и NGC6171

$F(r)$ и $\Delta F(r)$ Артюхиной, Холоповым (1966), Холоповым (1971) и Артюхиной (1966, 1968) для скоплений: Плеяды, Ясли и Волосы Вероники.

Прямоугольные координаты и звездные B -величины звезд скоплений и фона вокруг их на пластинках были измерены на ирисовом фотометре в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга, Москва. Точность измеренных координат составляет ± 0.05 мм, а подавляющее большинство измерений B -величин звезд имеет точность $\pm 0.1^m$. (Единственно в случае M56 были измерены только координаты всех звезд до предельной величины пластинок.) Данные об измерений

и ошибках в фотометрии приведены в работах Пейкова, Русева (1988a, 1988b, 1990, 1999a, 1999b), Русева, Пейкова (1986) и Пейкова, Кадийской (2002).

4 Дифференциальные и интегральные функции видимой и пространственной звездной плотности

Используя данные измерений пластинок и данные указанных выше каталогов Kustner и Рапаро, мы получили по единой методике звездных подсчетов Холопова (1981, 1953) и Пейкова, Русева (1991) (в предположении о сферической симметрии скоплений) следующие кривые распределения видимой звездной плотности в каждом из семи шаровых и одного (NGC2420) рассеянного скопления в зависимости от расстояния r от их центров:

а) дифференциальные кривые $\Delta F(r, \varphi, \Delta B)$, охватывающие звезды в разных интервалах ΔB величин. Они получены в восьми 90-градусных радиальных секторах скопления в проекции на картинную плоскость, отличающихся друг от друга по азимутальному углу φ на 45° (т.е. в восьми различных направлениях от центра скопления).

б) дифференциальные кривые $\Delta F(r, \Delta)$, усредненные по всем направлениям от центра скопления и определенные для тех же интервалов B -величин.

в) интегральные кривые $F(r,)$, усредненные по всем направлениям от центра скопления и охватывающие звезды до разных предельных B -величин. (Для скопления M56 получены только интегральные кривые до данной предельной величины звезд используемой пластинки).

г) дифференциальные кривые $\Delta F_{gr}(r)$, охватывающие звезды подсистем скопления, расположенные около его основных последовательностей на диаграмме (V , $B-V$). Эти кривые получены только для NGC2420, где мы имели в распоряжении B и V -фотометрии звезд скопления (рис. 4).

д) дифференциальные кривые равной видимой плотности звезд $\Delta F(r, \varphi, \Delta) = const$, позволяющие выявить видимую форму скопления.

Ко всем этим кривым прибавлены и полученные Артюхиной, Холоповым (1966), Холоповым (1971) и Артюхиной (1966, 1968) по той же методике кривые $\Delta F(r, \Delta V)$ и $F(r, V)$ для Плеяд, Яслей и Волос Вероники.

Данные о всех кривых ΔF и F можно найти в работах Русева, Пейкова (1986), Пейкова, Русева (1988a, 1988b, 1990, 1999a, 1999b), Пейкова, Кадийской (2002), Пейкова, Русева и Русевой (2002) и Пейкова (1990). Все использованные интервалы ΔB и ΔV и предельные B и V величины указаны прямыми линиями на диаграммах (V , $B-V$) исследуемых скоплений (рис. 1 – 4).

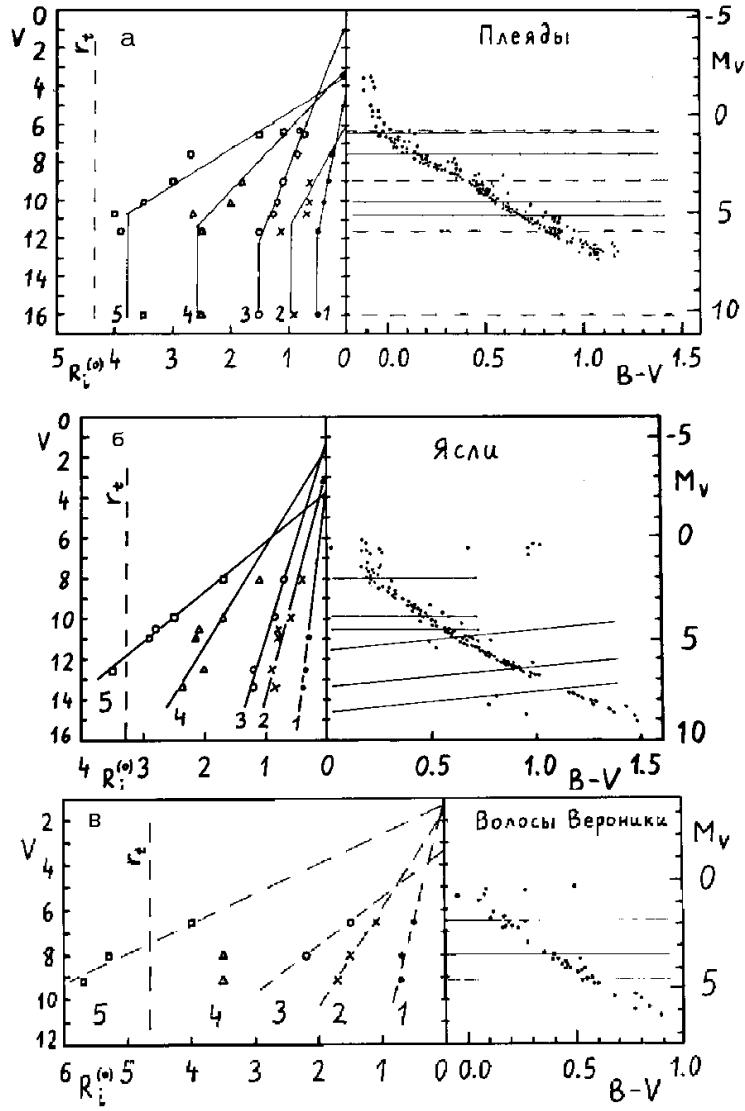
Переход из функций распределения видимой плотности звезд ΔF и F к соответствующим функциям (Δf и f) распределения пространственной плотности звезд в каждом скоплении был осуществлен при помощи численного метода Холопова (1949) в предположении о сферической симметрии. Данные для всех полученных кривых Δf и f можно найти в вышеуказанных работах.

5 Основные результаты исследований пространственной структуры рассматриваемых скоплений

5.1 Видимая форма скоплений

Анализ кривых равной видимой плотности звезд для разных подсистем скоплений M12, NGC6535, NGC6171, NGC5466, M92, M15 и NGC2420 привел к следующим выводам:

а) Все скопления имеют видимую форму, очень близкую к сферической (за исключением M92). При этом наибольшие отклонения от этой формы наблюдаются

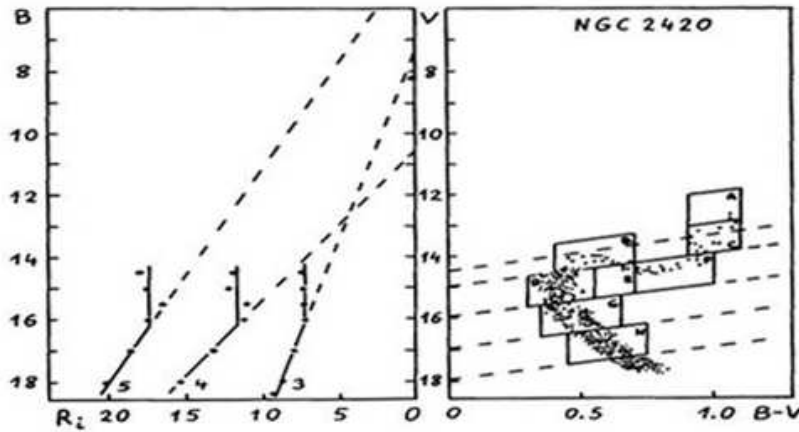


Фиг. 3. Иллюстрация основных результатов по исследованию структуры рассеянных скоплений Плеяды, Ясли и Волосы Вероники

при подсистемах ярких звезд и в областях корон скоплений, т.е. в тех случаях когда число использованных звезд наименьшее и флуктуации в их распределении максимальны. По мере перехода к большим B -величинам и вблизи центральных областей, кривые $\Delta F(r, \varphi, \Delta) = \text{const}$ сглаживаются. Наблюдаемые отклонения от сферической формы являются случайными (не повторяются для разных подсистем) и их можно не принимать во внимание.

б) Форма кривых равной видимой плотности для ядра и для короны обычно разная и меняется от одной к другой подсистеме. Это подтверждает выводы Холопова (1981).

в) Для некоторых подсистем NGC6171, NGC5466 и M15 наблюдается отсутствие внешней и части внутренней короны в разных направлениях от центра скопления.



Фиг. 4. Иллюстрация основных результатов по исследованию структуры рассеянного скопления NGC 2420

Подобный эффект замечен Артюхиной и Холоповым (1961) при исследовании старого рассеянного скопления М67. Причиной этой аномалии может быть либо действительная особенность в распределении звезд, связанная с минимумом их функции светимости в данном интервале звездных величин, либо невозможность заметить корону из-за ее малой плотности и больших флуктуаций звездного фона в данном направлении.

г) Единственное скопление, для которого замечена небольшая эллиптичность его внутренних частей (ядра) - это М92. В короне скопления, далеко от его центра, всякие отклонения от сферической формы случайны и могут не рассматриваться. Подобная эллиптичность для М92 также замечена и описана Блажих (1966).

д) Важным фактом является достижение больших расстояний от центра каждого скопления кривых равной плотности для подсистем слабых звезд ниже определенной предельной B -величины, а также и увеличение размеров скопления. При этом градиенты плотности $d(\Delta F)/dr$ в короне увеличиваются, а во внутренних частях - уменьшаются относительно тех же градиентов для подсистем ярких звезд.

е) Кривые равной плотности для старого рассеянного скопления NGC2420 (Пейков, Русев, Русева, 2002) ясно показывают систематические нарушения в монотонности хода кривых $\Delta F(r, \Delta)$ по r для всех рассматриваемых подсистем, что ясно показывает слоистый характер структуры этого скопления.

Последние два факта связаны с дальнейшими результатами этой работы.

5.2 Пространственные зоны в структуре скопления

(Анализ всех кривых ΔF , F , Δf и f для всех подсистем каждого скопления (шаровое или рассеянное) позволяет достаточно уверенно выделить несколько различных пространственных сферических зон в скоплении, подобных описанным Холоповым (1981), в которых градиент плотности приблизительно постоянен или слабо меняется, а на границе каждой зоны он претерпевает быстрые изменения. Число отдельных зон варьирует между скоплениями от пяти до семи, а сами зоны в соответствии с терминологией Холопова - следующие, подряженные по возрастанию расстояния r от центра скопления:

I. Центральная зона ядра с радиусом R_1 . Ее границу определяют как место, с которого начинается резкое уменьшение приблизительно постоянной центральной

плотности скопления. Для M92, M15, NGC2420 и некоторых подсистем слабых звезд других шаровых скоплений эта зона не может наблюдаться потому что соответствующие кривые плотности не достигают до центра скопления из-за перекрытия звезд на пластинках.

II. Внутренняя зона ядра простирающаяся с R_1 до радиуса R_2 . В ней происходит наиболее быстрое уменьшение звездной плотности. На ее границе R_2 это уменьшение сильно замедляется. (Для NGC2420 мы тоже не можем определить ее размер по данным каталога Papego).

III. Внешняя зона ядра, начинающаяся с R_2 до радиуса R_3 . Ею определяют как границу между ядром и короной скопления.

IV. Внутренняя корона, простирающаяся с R_3 до радиуса R_4 . Здесь происходит медленное убывание звездной плотности.

V и VI. Средние зоны короны с граничными радиусами R_5 и R_6 , в которых убывание плотности весьма мало. Для скоплений: M92, NGC6535, Плеяды, Ясли, Волосы Вероники и NGC2420 шестая зона не наблюдается и сами скопления простираются до R_5 .

VII. Внешняя корона, простирающаяся до радиуса R_7 . Эта зона наблюдается только в скоплениях NGC5466 и M15.

За радиус скопления R_c мы принимали радиус последней наблюдаемой зоны R_i , определяемый как точки пересечения ход кривых ΔF или F с линией среднего значения плотности звездного фона вокруг скопления.

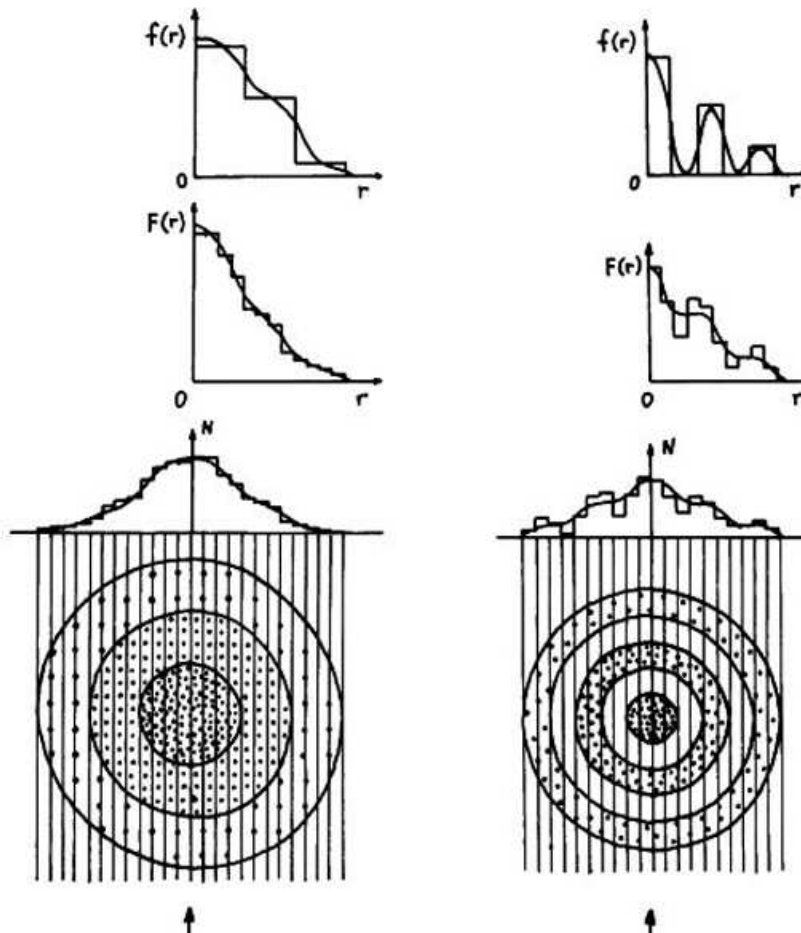
Иногда оказывается трудно или невозможно определить радиус данной зоны для некоторой подсистемы короны скопления в разных направлениях от его центра из-за слабого изменения градиента плотности между зонами и флуктуаций плотности в короне.

Средние значения радиусов зон R_i ($i = 1, 2, \dots$ - номер зоны) для разных подсистем скоплений в зависимости от предельной звездной величины приведены в минуты дуги на рис. 1 – 4 в сравнении с диаграммами (V, B-V) скоплений. (Нужно иметь ввиду, что большинство значений получено по достаточному количеству независимых определений данного R_i в различных направлениях от центра скопления и обладает высокой степенью достоверности). Подробности об определении радиусов зон можно найти в работах Русева, Пейкова (1986), Пейкова, Русева (1988a, 1988b, 1990, 1999a, 1999b), Пейкова, Кадийской (2002), Пейкова, Русева и Русевой (2002) и Пейкова (1990).

5.3 Слоистая структура скоплений

Другой интересный факт, замеченный по кривым ΔF и Δf , является следующим: во внутренних областях большинства зон обычно наблюдается превышение значения плотности над линией среднего градиента в зоне, а на ее границах - наоборот, что проявляется в виде ступеньки в ходе кривых $\Delta F(r, \Delta B)$ и в виде волн в ходе кривых $\Delta f(r, \Delta B)$ (см. Русева, Пейкова (1986), Пейкова, Русева (1988a, 1988b, 1990, 1999a, 1999b), Пейкова, Кадийской (2002), Пейкова, Русева и Русевой (2002) и Пейкова (1990)). Этот эффект наблюдается в основном в области короны скопления и по мере увеличения числа звезд (перехода к большим звездным величинам) постепенно замыкается. Он особенно хорошо замечается в случае рассеянных скоплений (Пейков, Русев Русева, 2002), где нередко нарушается монотонность хода кривых ΔF и Δf и наблюдаются слабо населенные звездами места. Подобные явления замечены и Холоповым (1981) для других скоплений.

С другой стороны, ширина каждой зоны $\Delta R_i() = R_i() - R_{i-1}()$ ($i = 3, 4, \dots$) данной подсистемы в случае шаровых скоплений приблизительно постоянна или слегка увеличивается по мере перехода к более внешним зонам (рис. 1 – 4). Исключение из этого правила наблюдается только для первой и второй зон R_1 и R_2 , ширина которых примерно вдвое меньше. Это можно объяснить тем, что только R_1 определяется как место, с которого градиент плотности df/dr резко увеличивается



Фиг. 5. Иллюстрация основных типов структуры шарового и рассеянного скопления

(Холопов (1981)), а другие R_i определяются как места, где df/dr уменьшается. Поэтому можно считать, что центральная зона ядра является только первой половиной внутренней зоны ядра и они обе вместе оформляют одну зону.

Все вышесказанное показывает, что, в известном смысле, исследуемые скопления имеют слоистые структуры разного типа, где отдельные слои - это указанные выше пространственные зоны скопления. Предельный случай структуры шарового скопления, состоящей из сферических слоев, плотно расположенных друг к другу, проиллюстрирована на рис. 5 а, а предельный случай структуры рассеянного скопления, состоящей из сферических слоев, расположенных на расстояниях друг от друга, показана на рис. 5 б. Разумеется, что реальная структура данного скопления гораздо сложнее чем показанные на рисунке два простых, предельных случаев.

5.4 Систематическое изменение пространственной структуры скоплений

5.4.1 Зависимость радиусов скоплений и радиусов зон от предельной звездной величины. Анализ всех значений радиусов R_i пространственных зон скоплений показал, что с звездной величины самых ярких звезд скопления до

некоторой предельной величины B_{lim} (соответственно V_{lim}) радиусы R_i в рамках точности приблизительно постоянны ($R_i(B) = const$), а выше B_{lim} они систематически увеличиваются, при этом увеличение больше для более внешних и меньше для более внутренних зон (рис. 1 – 4). Только для Плеяд, которые являются самым молодым скоплением из исследуемых, систематическое нарастание радиусов зон наблюдается по всей шкале звездных величин звезд скопления.

Сравнивая диаграммы „цвет-величина“ скоплений (рис. 1 – 4), мы находим, что B_{lim} , с которой начинается изменение $R_i(B)$, соответствует переходной области между ветвью субгигантов и точкой поворота ГП для шаровых скоплений и самой точке поворота для рассеянных.

Систематическое изменение R_i с B при $B > B_{lim}$ (соответственно V -величина для Плеяд и Яслей) было аппроксимировано нами методом наименьших квадратов (НМК) линейной зависимостью вида:

$$R_i = a_i B - b_i = a_i (B - B_{0i}), \text{ где } i = 1, 2, 3, \dots$$

Здесь параметры a_i , b_i и $B_{0i} = b_i/a_i$ - константы для i -ого радиуса. Их значения можно найти в работах Русева, Пейкова (1986), Пейкова, Русева (1988a, 1988b, 1990, 1999a, 1999b), Пейкова, Кадийской (2002), Пейкова, Русева и Русевой (2002) и Пейкова (1990). Параметр a_i (угловой наклон зависимости $R_i(B)$) имеет размерность длины (мин. дуги на зв. вел.) и зависит от видимого модуля расстояния до скопления и выбора фотометрической системы. Вторым параметр B_{0i} является той величиной, при которой соответствующий радиус $R_i(B)$ стал бы равен нулю, если продолжит зависимость на $B < B_{lim}$ (на рис. 1 – 4 это изображено штриховыми прямыми линиями). Сразу отметим, что значения B_{0i} в пределах ошибки не очень различаются между собою.

Пользуясь данными для всех $R_i(B)$, мы можем вычислить относительные радиусы зон:

$$\tilde{r}_i = R_i(B)/R_4(B)$$

для всех (соответственно V). Везде для нормировки выбран радиус $R_4(B)$, потому что он точнее определяется из наблюдений, чем радиус скопления $R_c(B)$ (при этом и число зон в разных скоплениях - различное). Значения $\tilde{r}_i$ можно найти в работах Русева, Пейкова (1986), Пейкова, Русева (1988a, 1988b, 1990, 1999a, 1999b), Пейкова, Кадийской (2002), Пейкова, Русева и Русевой (2002) и Пейкова (1990). Для всех $\tilde{r}_i$ получаются в пределах ошибок приблизительно одинаковые значения при всех предельных -величин, т.е. $\tilde{r}_i(B) \approx const$. Другими словами, нарастание $R_i(B)$ с B в первом приближении происходит гомологически. (Гомологичность между ядром и короной слегка нарушается для NGC5466, M92 и NGC2420, но в настоящее время нельзя сказать случайно ли это нарушение или нет). Такое скопление, для которого $\tilde{r}_i(B) = const$, мы называем гомологическим и есть основания считать, что относительную структуру скоплений, выражаемую через $\tilde{r}_i$, можно сопоставлять и изучать независимо от предельных величин, до которых проведены подсчеты звезд разными авторами.

Из постоянства: $\tilde{r}_i(B) = const$ и наличия линейной зависимости: $R_i = a_i(B - B_{0i})$ следует, что все значения параметра B_{0i} для всех i у гомологического скопления должны быть равны между собою, т.е. $B_{0i} = B_0$, как и наблюдается, в рамках ошибки. Сопоставляя значения a_i и b_i методом НМК:

$$b_i = B_0 a_i$$

мы нашли значение B_0 (соответственно V_0) для каждого скопления. Эти значения в видимых и в абсолютных величинах M_{B_0} можно найти в работах Русева, Пейкова (1986), Пейкова, Русева (1988a, 1988b, 1990, 1999a, 1999b), Пейкова, Кадийской (2002), Пейкова, Русева и Русевой (2002) и Пейкова (1990).

Сопоставляя значения параметра a_i с относительными радиусами $\tilde{r}_i$ методом НМК, мы находим следующую эмпирическую зависимость в скоплениях:

$$a_i = A \tilde{r}_i$$

где $A = \text{const}$ для данного скопления (значения можно найти в вышеуказанных работах).

Наконец, получена единая зависимость для размеров пространственной гомологической структуры данного скопления:

$$R = A\tilde{r}(B - B_0) \text{ при } B > B_{lim}$$

До каких предельных величин в сторону слабых звезд она может быть экстраполирована, пока неясно.

5.4.2 Зависимость дифференциальной и интегральной пространственной плотности звезд у границ зон от предельной звездной величины. Это второе проявление систематического изменения пространственной структуры скопления с изменением звездной величины исследуемых подсистем. К сожалению, мы успели его проследить только для исследованных шаровых скоплений.

На основании данных для $R_i(B)$ и кривых f и Δf нами получены соответствующие значения пространственной плотности звезд $f(R_i(B), B)$ и $\Delta f(R_i(B), \Delta B)$ (или, что тоже самое, $f(\tilde{r}_i, B)$, $\Delta f(\tilde{r}_i, \Delta B)$) на границах пространственных зон для всех предельных -величин и интервалов ΔB . Эти значения можно найти в работах Русева, Пейкова (1986), Пейкова, Русева (1988a, 1988b, 1990, 1999a, 1999b), Пейкова, Кадийской (2002), Пейкова, Русева и Русевой (2002) и Пейкова (1990). На рис. 1 – 2 приведена зависимость $\ln(\Delta f(R_i(B), \Delta B)/\Delta B)$ для соответствующей зоны скопления в число звезд на куб. мин. дуги на единичный интервал зв. вел.

Функция $f(R_i(B), B)$ можно рассматривать как интегральную функцию светимости, а $\Delta f(R_i(B), \Delta B)$ - как дифференциальную функцию светимости для единицы объема скопления в зависимости от относительного расстояния $\tilde{r}$ от его центра, статистически свободную от влияния звезд фона и эффекта проекции его его внешних частей на внутренние.

Сравнение гистограмм $\ln(\Delta f_i/\Delta B)$ (см. рис. 1 – 2) показывает, что и здесь при $B > B_{lim}$ для каждого скопления наблюдается систематическое изменение в его пространственной структуре. Средние логарифмические наклоны:

$$\frac{\partial}{\partial B} \left(\ln \frac{\Delta f(R_i(B), \Delta B)}{\Delta B} \right) \text{ при } B < B_{lim}$$

приблизительно постоянны для разных зон (разных $\tilde{r}_i$), а при $B > B_{lim}$ они систематически увеличиваются по мере перехода от центральной к самой внешней зоне скопления. Таким образом, мы можем сделать вывод, что скорость нарастания числа слабых звезд около точки поворота ГП и ниже ее наименьшая в ядре и наибольшая в короне скопления, т. е. слабые звезды обладают меньшей концентрацией к центру системы. Кроме того, сама функция светимости скопления при $B > B_{lim}$ зависит от расстояния от его центра.

К сожалению, мы не успели получить реальной аналитической зависимости кривой $\ln(\Delta f(R_i(B), \Delta B)/\Delta B)$ от из-за малости полученного из наблюдений участка кривых выше B_{lim} и возможной нелинейности этой зависимости. Для рассеянных скоплений исследование зависимости плотности звезд на границах пространственных зон от предельной звездной величины их подсистем затруднено из-за особенности их слоистой структуры (рис. 4) - нередко на границах зон звездная плотность весьма мала или стремится к нулю. Все таки, основные выводы, получены нами для шаровых скоплений, подтверждаются многими авторами и для рассеянных (см. напр. Холопов, 1981).

6 Обсуждение результатов

Конкретное обсуждение полученных здесь результатов и возможные гипотезы, связанные с систематическим изменением структуры скоплений будет рассмотрено в второй статье из этого цикла. Чтобы показать реальное существование самого систематического изменения структуры здесь мы рассмотрим только влияние возможных внешних факторов, которые могли бы привести к наблюдаемому эффекту:

1. Фотографический эффект пластинок.

Можно ожидать систематического изменения определенных В-величин звезд (соответственно и числа звезд) данной подсистемы с изменением расстояния от центра скопления из-за повышения фона неба и засветки пластинки яркими центральными частями системы. Однако это предположение не может объяснить наблюдаемый эффект, так как мы не принимали во внимания центральные области скопления, где это влияние наиболее сильно. Кроме того, наибольшие изменения в структуре наблюдаются в самых внешних частях (в короне), где фотографический эффект минимален.

Как показывают специальные исследования (Kunchev, Ivanov (1986) и Kunchev, Nikolov (1986)) 2-метровый телескоп НАО Болгарии не обладает существенной ошибкой поля и цветового уравнивания. Его радиус невиньетированного поля вполне достаточен чтобы охватить скопление и звездный фон вокруг него. Исследуемые скопления получены на пластинках с разными эмульсиями и попадают на линейный участок их характеристических кривых. Кроме того, для рассеянных скоплений мы использовали фотометрические данные, которые получены другими авторами (Пейков (1990), Рараго (1982)). Все это отвергает предположение о действии фотографического эффекта.

2. Перекрывание звезд на пластинках.

Поскольку центральные области (где перекрывание значительно) не рассматривались, это влияние не может объяснить наблюдаемое систематическое изменение. Во внешних частях скопления перекрывание минимально и не влияет заметным образом на кривые F и f .

3. Влияние звезд фона вокруг скопления.

Фон и его флуктуации влияют на определение размеров сильно разреженных корон. Но это влияние имеет в основном случайный, а не систематический характер. Кроме того, изменения структуры наблюдаются и в ядре, где влияние фона практически равно нулю. Наконец можно сказать, что выделение членов скопления среди звезд фона может быть выполнено, если исследовать собственные движения звезд, как напр. это было сделано в работе Geffert et al (1991), на базе пластинок 2 метрового телескопа Национальной обсерватории на т. Рожен.

4. Систематическое изменение в структуре наблюдается у всех скоплений - как шаровых, так и рассеянных, имеющих различные параметры и находящиеся на разных расстояниях от Солнца. Это показывает, что оно не обусловлено различным расположением скоплений в Галактике и условиями их видимости.

Все вышесказанное показывает, что систематическое изменение в структуре скоплений представляет собой реально существующий физический эффект в этих объектах.

Наконец мы отметим следующее:

1. Наличие пространственных зон в звездных скоплениях (рассеянных и шаровых) - хорошо известное явление, подтверждено многими авторами (Холопов (1953, 1981, 1971a, 1971b), Артюхина, Холопов (1961, 1966), Артюхина (1966, 1968), Рараго (1982), Благих (1966) и т. д.). Нередко однако встречаются и авторы, которые не принимают наличие пространственных зон. Изучая пространственную структуру скоплений, они проводят весьма сглаженные кривые плотности $F(r)$ и $\Delta F(r)$ и таким образом стирают все детали в их ходе (Пейков, Русев (1991)). Естественно, при таком сглаживании, трудно выделить какие либо пространственные зоны, кроме ядра и короны.

2. Наличие систематического изменения структуры рассеянных скоплений - изменение их радиуса (так называемый плечевой эффект) со звездной величиной и их функции светимости также подтверждается многими авторами (Холопов (1981), Shapley (1930) и др.), но до сих пор оно не исследовано подробно по единой методике. (Кроме того, иногда считают, что систематическое изменение структуры скоплений является нереальным, инструментальным эффектом.) Нужно выделить особое внимание на работу Raboud, Mermilliod (1998), в которую авторы полностью подтверж-

дают наши результаты о структурно-массовой сегрегации звезд в Плеядах и увеличении размеров скопления с увеличением V -величины звезд его подсистем.

3. Наличие систематического изменения пространственной структуры шаровых скоплений (нарастание радиусов зон и скопления и изменение функции светимости) почти неизвестно до сих пор, так как эффект проявляется выше B_{lim} , а подробные структурные исследования до таких больших предельных величин - совсем немногочисленные. Все таки отметим работы Tayler (1954) и Geyer, Hopp (1982), в которых есть данные о зависимости радиусов скопления от звездной величины.

В заключение отметим, что только сравнение по единой методике структуры различных по своим параметрам скоплений, полученной до больших предельных величин, позволило бы полностью изучить обнаруженное явление.

Авторы выражают благодарность Цветану Георгиеву, Орлину Станчеву и Василу Попову за внимание к этой работе и помощь при ее оформлении.

Литература

- Артюхина Н. М., 1966, Астрон. журн., т.43, с.132.
 Артюхина Н. М., 1968, Астрон. журн., т.45, с.1246.
 Артюхина Н. М., Холопов П.Н., 1961, Астрон. журн., т.38, с.1039.
 Артюхина Н. М., Холопов П.Н., 1966, Астрон. журн., т.43, с.567.
 Благих А. П., 1966, Астрон. журн., т.43, с.138.
 Кукаркин Б. В., 1974, „Шаровые звездные скопления“, М., Наука.
 Пейков З. И., 1990, Астрон. журн., т.67, с.1141.
 Пейков З. И., Кадийская Р. Й., 2002, Астрон. журн., т.79, с.205.
 Пейков З. И., Русев Р. М., 1988a, Астрон. журн., т.65, с.41.
 Пейков З. И., Русев Р. М., 1988b, Астрон. журн., т.65, с.317.
 Пейков З. И., Русев Р. М., 1990, Астрон. журн., т.67, с.694.
 Пейков З. И., Русев Р. М., 1991, Астрон. журн., т.68, с.78.
 Пейков З. И., Русев Р. М., 1999a, Астрон. журн., т.76, с.514.
 Пейков З. И., Русев Р. М., 1999b, Астрон. журн., т.76, с.571.
 Пейков З. И., Русев Р. М., Русева Т., 2002, Астрон. журн., т.79, с.300.
 Холопов П. Н., 1949, Астрон. журн., т.26, с.298.
 Холопов П. Н., 1953, Астрон. журн., т.30, с.426.
 Холопов П. Н., 1971a, Астрон. журн., т.48, с.316.
 Холопов П. Н., 1971b, Астрон. журн., т.48, с.529.
 Холопов П. Н. 1981, „Звездные скопления“, М., Наука.
 Alcaïno G., 1979, Vistas in Astronomy, v.23, p.1.
 Geffert M., Tucholke H. J., Georgiev Ts. B., Le Campion J. F., 1991, Astrn. and Astrophys. Suppl. Ser., v.91, p.487.
 Geyer E. H., Hopp U., 1982, Astrophys. Space Science, v.84, p.133.
 Kunchev P. Z., Ivanov G., 1986, Astrophys. Space Science, v.122, p.235.
 Kunchev P. Z., Nikolov N., 1986, Astrophys. Space Science, preprint.
 Kustner F., 1920, Veroff. Der Universitats - Sternwarte zu Bonn, No14, p.1.
 Paparo M. 1982, Commun. Konkoly Obs. Hungarian Acad. of Sci., No81, p.103.
 Raboud D., Mermilliod J., 1998, Astron. Astrophys., v.329, p.101.
 Русев Р. М., Пейков З. И., 1986, Астрон. журн., т.63, с.483.
 Shapley H., 1930, „Star clusters“, New York, London, Mc Graw Hill Book Comp.
 Tayler R. J., 1954, Astron. J., v.59, p.413.