



УДК 524.3–14

Околосолнечное звездно-субзвездное окружение. III. Статистические связи и функции распределения

В.А. Захожай¹, М.А. Бабенко²¹Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина²Херсонский государственный университет

Анализируются статистические связи, выявленные между основными характеристиками звезд и субзвезд, как следствие рассчитанных их физических эволюционных моделей, и обсуждается их физический смысл. Рассматриваются вычисленные дифференциальные функции распределения астрофизических характеристик звезд и субзвезд. Проводятся анализ и графики вычисленных спектров масс и радиусов, функций светимости, масс, угловых диаметров и металличностей ближайших звезд и субзвезд, и сравнение их с результатами аналогичных вычислений для других выборок звезд Галактики.

НАВКОЛОСОНЯЧНЕ ЗОРЯНО-СУБЗОРЯНЕ ОТОЧЕННЯ. III. СТАТИСТИЧНІ ЗВ'ЯЗКИ ТА ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ, Захожай В.А., Бабенко М.О. — Аналізуються статистичні зв'язки, виявлені між основними характеристиками зір і субзір, як наслідок розрахованих їх фізичних еволюційних моделей, і обговорюється їх фізичний зміст. Розглядаються обчислені диференціальні функції розподілу астрофізичних характеристик зір і субзір. Наводяться аналіз та графіки розрахованих спектрів мас і радіусів, функцій світності, мас, кутових діаметрів і металічностей найближчих зір і субзір, і порівняння їх з результатами аналогічних обчислень для інших вибірок зір Галактики.

SOLAR STELLAR AND SUBSTELLAR ENVIRONMENT. III. STATISTICAL BONDS AND DISTRIBUTION FUNCTIONS, by Zakhozhay V.A., Babenko M.O. — Statistical connections between the main stellar and substellar characteristics, as a consequence of their computed physical evolutionary models are analyzed. The calculated differential distribution functions of the stellar and substellar astrophysical properties are considered. The analysis and graphs of calculated mass and radii spectra, functions of luminosity, masses, metallicity and angular diameters of nearest stars and substars are presented. The comparison with results of similar calculations for other samples of stars in the Galaxy are presented.

Ключевые слова: звезды; субзвезды; определение физических характеристик звезд.

Key words: stars; substars; determination of stellar physical characteristics.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе завершается подведение итогов исследования околосолнечного звездного и субзвездного окружения. Первая работа была посвящена местоположению Солнца в Галактике, звездным каталогам, которые ранее использовались и которые можно в настоящее время применить для решения широкого круга задач звездной статистики [10]. Во второй работе анализировалась классификация космических тел (важная для понимания природы компонентов звездных систем, которые наблюдаются в окрестностях Солнца) и результаты определения основных характеристик звезд и субзвезд [11]. В предлагаемой работе приводятся и анализируются основные статистические связи, выявленные между различными характеристиками звезд и субзвезд, а также вычисленные их функции распределения. Это и является основной целью предлагаемой статьи.

Зависимости между астрофизическими характеристиками звезд и субзвезд имеют большое значение для понимания их структуры и физических процессов, происходящих на определенных этапах эволюции. Однако записать аналитические связи между основными характеристиками звезд и субзвезд не представляется возможным, поскольку их значения являются следствием численного решения известных систем дифференциальных уравнений. Изменение начальных условий при таких расчетах позволяет получать физические эволюционные модели звезд и субзвезд. Чтобы связать между собой основные характеристики звезд и субзвезд необходимо установить определенные закономерности, которым они подчиняются на разных этапах эволюции. Существование таких закономерностей следует ожидать в тех случаях, когда звезды (и/или субзвезды) находятся на ключевых стадиях развития (например, на главной последовательности) и когда структура их недр по каким-либо признакам являются типичными (закономерно изменяются границы ядер и конвективных оболочек; излучение переносится вследствие радиации, конвективным механизмом или путем теплопроводности и т.д.).

В результате проведенного большого числа моделирований внутреннего строения звезд и субзвезд (см., например, базу данных [26]), накопления наблюдательного материала об основных характеристиках

звезд и субзвезд [45, 57, 68, 69] начался процесс обобщения этого материала. Были выявлены статистические связи между массами, радиусами, светимостями и эффективными температурами [36, 48, 60, 73], изучался вопрос влияния на полученные результаты элементного состава [31]. Результаты таких исследований имеют большое значение для изучения тех систем, у которых нет возможности определить прямыми методами характеристики их компонентов. С другой стороны, если для какой-либо звезды или субзвезды определены часть характеристик, то анализируя их и применяя теорему Фогта–Рессела можно выполнить оценку для значений недостающих характеристик.

Исследование частоты встречаемости звезд и субзвезд, имеющих определенные основные характеристики, — одна из важнейших задач звездной статистики. Такие задачи решаются путем вычисления дифференциальных и интегральных функций распределения масс, абсолютных величин, металличностей и т.д. Эти функции распределения имеют исключительное значение для понимания структуры, происхождения и эволюции исследуемых выборок звезд и субзвезд. К важнейшим таким выборкам объектов относят области непосредственного окружения Солнца.

2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ОСНОВНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

На основании наблюдательных данных и теоретических исследований были выявлены ряд закономерностей между астрофизическими характеристиками звезд, такие как «масса — светимость», «светимость — эффективная температура», «масса — эффективная температура», «радиус — эффективная температура», «масса — радиус», «время жизни на главной последовательности — масса звезд нулевого возраста» (см., например, [5, 8, 19, 35, 61]). Сведение воедино всех основных характеристик для звезд ранее не проводилось. Решение такой задачи получило развитие в найденных соотношениях эволюционных моделей субзвезд. Ниже анализируются полученные эволюционные модели субзвезд, предпринимается попытка использования такой идеи для нахождения аналогичных связей для звезд и предлагаются естественные объяснения ранее полученных вышеупомянутых фундаментальных зависимостей.

Эволюционные модели субзвезд и их следствия. Рассматривая субзвезды как политропные «шары», применялись выражения для связей их радиуса с центральными температурами и плотностями [23, 65]. Связь значений параметров вырождения в центральных областях с общим радиусом субзвезд использовалась для расчетов эволюционных моделей [34]. Зависимость центральной температуры от среднего числа нуклонов и энергии Ферми дает оценку радиуса вырожденных карликов [30]. Учет действия электростатической энергии ядер, погруженных в «море электронов», и уменьшения кулоновской энергии отталкивания электронов из-за принципа запрета использовались для получения интерполяционных формул радиусов субзвезд [43, 65–77]. Выражение для светимости, записанное в виде связи центральной температуры и градиента уменьшения их радиуса, применялось для построения эволюционных моделей субзвезд [66]. На основании предложенной системы дифференциальных уравнений, в состав которой вошли выражение для расчета градиента параметра вырождения и адиабатические коэффициенты нового вида, в последнее десятилетие разработана физическая эволюционная модель [9, 18], позволяющая рассчитать внутреннюю структуру субзвезд, находящихся в адиабатическом равновесии.

Наряду с установлением аналитических связей между определенными физическими характеристиками субзвезд, в современных эволюционных моделях [29, 33, 64, 66] рассчитывались зависимости эффективных температур T_{eff} (в кельвинах) и светимостей L (в солнечных единицах) субзвезд от их массы m , возраста t и коэффициента непрозрачности κ (нормированных на определенные значения t_0 , m_0 , κ_0) в следующем виде

$$T_{\text{eff}} \approx \alpha'_{1i} \left(\frac{m}{m_0}\right)^{\alpha'_{2i}} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\alpha'_{3i}} \left(\frac{\kappa}{\kappa_0}\right)^{\alpha'_{4i}} K, \quad (1)$$

$$L \approx \gamma'_{1i} \left(\frac{m}{m_0}\right)^{\gamma'_{2i}} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\gamma'_{3i}} \left(\frac{\kappa}{\kappa_0}\right)^{\gamma'_{4i}} L_{\odot}, \quad (2)$$

где: α_{ji} , γ_{ji} (i -е значения j -ых авторов: 1 — [66], 2 — [29], соответственно).

Подстановка стандартного выражения для светимости в формулу (2), с учетом зависимости (1), дает возможность записать аналогичную связь между радиусом субзвезды R/R_{\odot} и t , m , κ . Непрозрачность, в рамках рассчитываемых моделей, зависит от массы (радиуса или эффективной температуры) субзвезды и ее возраста. Поэтому ее можно выразить через эти величины, что позволяет выражения эффективных температур (1), светимости (2) и радиуса представить в следующем виде

$$T_{\text{eff}} \approx \alpha_{1i} (m/m_{\odot})^{\alpha_{2i}} t_r^{\alpha_{3i}} K, \quad (3)$$

$$R \approx \beta_{1i} (m/m_{\odot})^{\beta_{2i}} t_r^{\beta_{3i}} R_{\odot}, \quad (4)$$

$$L \approx \gamma_{1i} (m/m_{\odot})^{\gamma_{2i}} t_r^{\gamma_{3i}} L_{\odot}, \quad (5)$$

где возраст выражен в годах $[t] = t_r$, а связи между α_{ji} и α'_{ji} , β_{ji} и β'_{ji} , γ_{ji} и γ'_{ji} легко получить. Именно в таком виде были получены решения для моделей субзвезд в работах [9, 18].

Логарифмирование системы уравнений (3)–(5) и использование зависимости «масса — эффективная температура» (3) позволяют представить их в следующем виде:

$$\lg(m/m_{\odot}) = a_1 \lg T_{\text{eff}} + a_2 \lg t + a_3, \quad (6)$$

$$\lg(R/R_{\odot}) = b_1 \lg T_{\text{eff}} + b_2 \lg t + b_3, \quad (7)$$

$$\lg(L/L_{\odot}) = c_1 \lg T_{\text{eff}} + c_2 \lg t + c_3, \quad (8)$$

где связи между a_j , b_j , c_j и α_{ji} , β_{ji} , γ_{ji} легко устанавливаются. Первое уравнение системы (6) демонстрирует изменение эффективной температуры со временем при постоянной массе. Второе уравнение (7) дает зависимость радиуса субзвезды от ее эффективной температуры и возраста, а третье (8) — положение субзвезд на диаграмме Герцшпрунга–Рессела.

Статистические связи между основными характеристиками звезд. Зависимости, аналогичные (6)–(8), существуют и для звезд. Действительно, если изменениями параметра звезды слева в этой системе уравнений со временем можно пренебречь (что может быть характерным на определенной стадии развития, например, на главной последовательности), $\lg t$ становится постоянной величиной, и они принимают известную функциональную форму. Такие связи ранее были получены Свечниковым и Тайдаковой [19] для зависимости «масса — эффективная температура» звезд, и Захожаем для зависимостей «радиус — эффективная температура» [8] и «абсолютная величина — эффективная температура» ближайших звезд [5]. Существуют и другие известные зависимости, которые можно получить из системы уравнение (6)–(8): «масса — светимость», «масса — радиус», «время пребывания на главной последовательности — масса звезд нулевого возраста» (которое можно оценить из выражения (6) в предположении, что эффективная температура за время горения водорода остается примерно постоянной), фигурирующие в астрофизике и звездной астрономии [35, 61]. Их функциональный вид можно получить из этой системы уравнений.

В систему уравнений (6)–(7) входят четыре из пяти основных характеристик космических тел: массы, радиусы, эффективные температуры и возраст. Пятая основная характеристика — элементный состав — входит неявно: от нее должны зависеть коэффициенты a_i , b_i , c_i . Это видно из выражения (8), представляющего собой ветвь главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рессела. В субкарликах, типичных представителях населения II Галактики, идут ядерные реакции, как и у звезд населения I, которые находятся на главной последовательности. Эти ветви имеют примерно один и тот же наклон, но различаются по элементному составу. Об этом же свидетельствует и рассчитанная Керелем де Стробелом [31] ветвь главной последовательности нулевого возраста для звезд с различным элементным составом, приведенная на рис. 4 Марочником и Сучковым в монографии [15].

3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕЗД И СУБЗВЕЗД

За время исследования статистических свойств окрестностей Солнца наибольшее место отводилось определению функций светимости, масс и металличности. Вычислялся спектр радиусов звезд. Плотности распределения эффективных температур и возрастов звезд не вычислялись.

Функция светимости. Первые определения функции светимости $\varphi(M)$ были выполнены в начале XX века по косвенным данным о параллаксах звезд, когда не было достаточно полных и надежных каталогов близких звезд: работы Каптейна и ван Райна [46, 47]. В 30-е годы Лейтен [53] ввел понятие приведенного собственного движения — H , которое в нулевом приближении можно линейно связать с абсолютной величиной звезд — M . Этим методом он определил функцию светимости для $\sim 10^5$ звезд южного полушария. Вслед за ним Шацова [24], сравнивая параллаксы близких звезд, вычисленные по приведенным собственным движениям и определенные тригонометрическим методом, показала, что константы, связывающие M и H , зависят от звездной величины и собственного движения, что приводит к существенному занижению вклада звезд низкой светимости в функцию светимости.

Ишханов [14] для вычисления функции светимости применил метод экстраполяции значений $\varphi(M_i)$ к нулевому расстоянию. Эта идея имеет тот недостаток, что если число каких-либо звезд с абсолютными величинами M_j окажется полным в объеме с радиусом r , то экстраполяция к нулевому значению приведет к завышению значений $\varphi(M_i)$, что в итоге приведет к существенным ошибкам функции светимости близких звезд. В работе Гусевой с соавторами [41] представлены две функции светимости, вычисленные по каталогам звезд до 22.2 пк [37] и до 25 пк [37–39].

Вычисленные функции светимости Ярейса и Вилена [44], Шацовой [24] представляют трудность в их использовании по следующим причинам. В первой из них приведены только значения максимумов и минимумов, а вторая функция светимости приведена графически и сравнивается с полученной ранее $\varphi(M)$ Лейтена [54]. Сравнения функций светимости МакКаски, ван Райна, Стариковой [21], Лейтена представлены в работе [56]; Лейтена, Ваннера, Паренаго и Ишханова — в работе [14]; Паренаго [17] и Лейтена [55] (методом моментов) было выполнено Агекином [1].

Сравнение вышеперечисленных функций светимости (с которыми это представилось выполнить, исходя из приведенных работ) показало, что средняя функция светимости на интервале абсолютных величин $M_V \geq 1^m$ имеет два максимума ($M_V = 6^m, 11^m$) и один минимум ($M_V = 7^m$). Эти экстремумы близки к значениям функции светимости, построенной Захожаем для звезд расположенных ближе 10 пк [3, 5]. На рис. 1а приведена функция светимости, построенная методом Паренаго [16] для всех звезд и звезд главной последовательности, расположенных ближе 10 пк (по версии каталога Захожая [74]). Из этого рисунка видно, что максимумы функций ($M_V = 6^m, 11^m$) соответствуют выше обсуждаемым значениям. Дальнейший ход функции объясняется наблюдательной селекцией звезд с абсолютными значениями больше 11^m , расположенных ближе 10 пк от Солнца.

Аналитически описать функции светимости не удалось. Была попытка аппроксимировать одной или двумя гауссовыми распределениями [63], но это направление не получило развития. С 1980-хх гг. функцию светимости больше стали вычислять не в связи с анализом распространенности абсолютных величин для объяснения процессов звездообразования, а для анализа или вычислений функций масс (см., например, [27, 28, 40, 59, 67]). На смену $\varphi(M)$ пришли определения функций распределений звезд по их массам, играющие ключевую роль в понимании процессов звездообразования.

Спектр и функция масс. Распределения чисел звезд приходящиеся, на единичный интервал массы (дифференциальное частотное распределение — $n(m)$) и на единичный логарифмический интервал — $\xi(\lg m)$, называют спектром масс и функцией масс звезд, соответственно [20]. Поскольку есть связь между массой звезд и их светимостью, а, следовательно, и между абсолютной величиной, функция светимости долгое время оставалась базовой для вычисления спектра масс. Если интервал масс, на котором установлена эта функция, меньше звездного, то могут фигурировать названия «звездно-субзвездный» спектр или «функция масс» (ЗССМ или ЗСФМ). Если у этих распределений в качестве аргумента фигурируют звезды и субзвезды нулевого возраста, то их называют либо начальными ЗССМ (или ЗСФМ), либо ЗССМ (или ЗСФМ) нулевого возраста. При аппроксимации этих распределений степенными функциями они характеризуются: спектр масс — показателем степени γ , функция масс — наклоном x , кото-

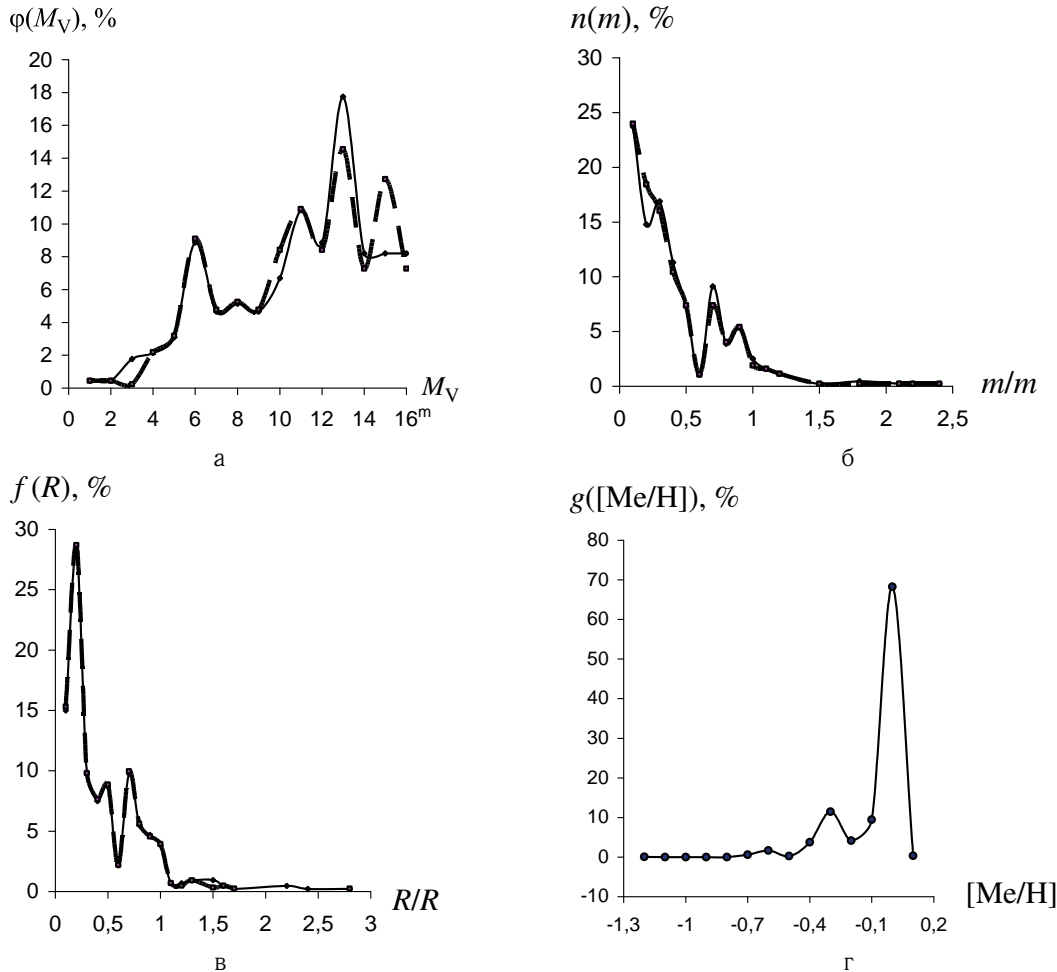


Рис. 1. Плотности распределения астрофизических параметров звезд: а — абсолютных величин (функция светимости); б — масс; в — радиусов; г — металличностей. Для всех звезд распределения показаны сплошной линией (—), для звезд главной последовательности — пунктиром (- - -).

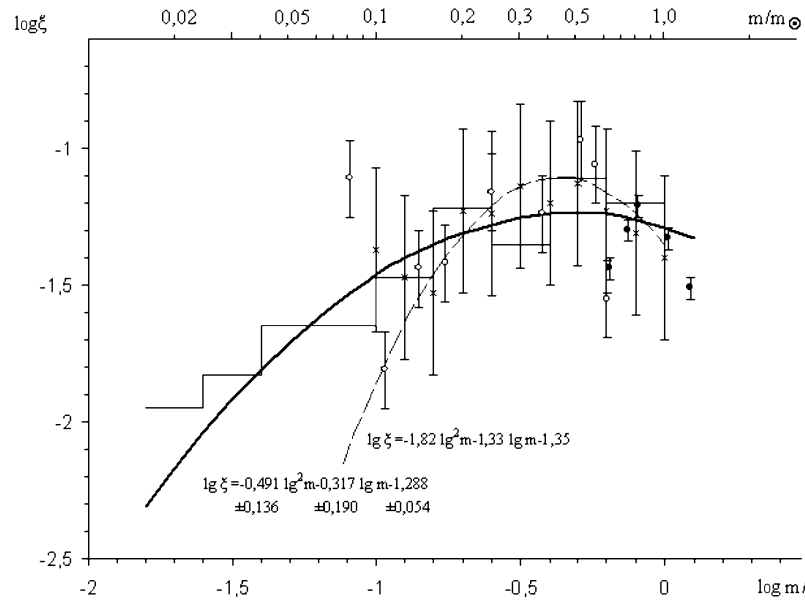


Рис. 2. Распределение масс звезд и субзвезд (логарифм функции масс — $\log \xi = \lg \xi(\lg m/m_{\odot})$) по данным космических и наземных наблюдений (приведенное из работы [76]): гистограмма соответствует данным, которые были получены с помощью метода лучевых скоростей (открытые компоненты с массами $< 1m_{\odot}$ — Удри и др. [71]; НФМ, вычисленная по данным о 257 М-карликах, анализируемых в изображениях КТХ (○) — Гоулд Бакал и Флин [40], и объединенная с данными Солпитера [62] (●); сглаженное распределение масс звезд, которые находятся ближе 10 пк от Солнца (×) — Захойай [6]. Показаны НФМ: пунктиром — Гоулд, Бакал и Флин [40], непрерывной линией — полученная в этой работе. Массы, фигурирующие в формулах на рисунке, даны в массах Солнца.

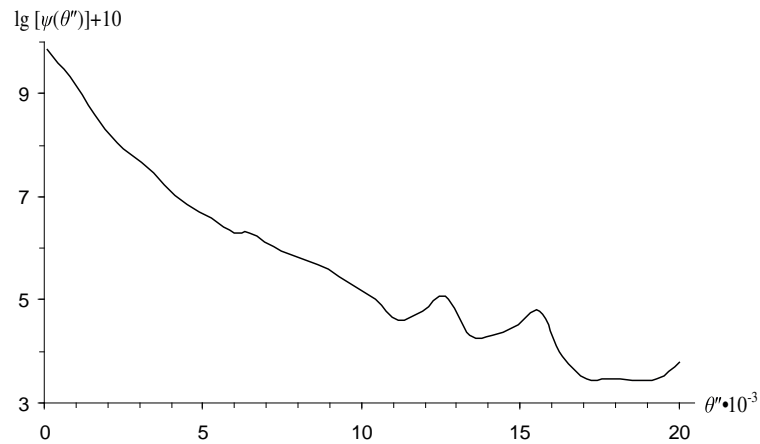


Рис. 3. Функция распределения угловых диаметров ближайших звезд. Размерность: $[\theta'']$ — угловые секунды дуги. Данные приведены из работы [5].

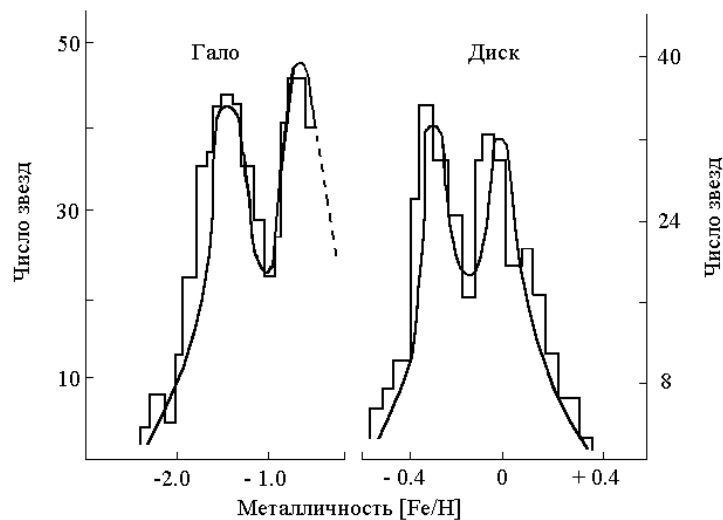


Рис. 4. Распределение металличностей звезд гало (выборка субкарликов и звезд RR Лиры) и звезд диска (выборка карликов класса G) в окрестности Солнца. Данные приведены из работы [22].

рые, как нетрудно показать [20], различаются на единицу — $\gamma = -(1+x)$.

Солпитер первым получил спектр масс звезд главной последовательности с $\gamma = -2.35$ на интервале $(0.4...10)m_{\odot}$ [62]. Позже этот интервал неоднократно подвергался сомнениям, особенно его нижняя граница. Например, по результатам исследований, проведенных Сервино и Мас-Хессе в областях звездообразования, солпитеровскому показателю степени лучше соответствует интервал масс $(2...120)m_{\odot}$ [32].

Для объяснения распределения маломассивных звезд, солнечных и несколько больших масс Скало предложил использовать лог-нормальный закон [20] с показателем спектра масс $\gamma = -(1.94 + 0.94 \lg m)$, который принимает значения: $\gamma = -1$ при $0.1m_{\odot}$, $\gamma = -1.9$ при $1m_{\odot}$, $\gamma = -2.9$ при $10m_{\odot}$, $\gamma = -3.8$ при $100m_{\odot}$.

Диапазон изменения показателя степени спектра масс звезд околосолнечного окружения находится в пределах: $\gamma = -0.4 \div -3.3$ (Скало [20]; Солпитер [62]; Захой [5, 7]; Хенри и Мак-Карти [42]; Тинсли [70]; Кроупа и др. [49, 50]; Рейд и Гизис [59]; Верещагин и Чупина [2]). Разброс в γ связан с выбором: интервалов масс, на которых производилась аппроксимация спектра масс степенной зависимостью (как правило, степень по модулю растет с увеличением масс звезд); разных выборок и методов вычисления спектра масс. Этот диапазон изменения показателя степени спектра масс практически совпадает с соответствующим диапазоном γ для рассеянных скоплений [7]. Анализ показал, что существуют модели, при низких значениях минимальной массы субзвезд, когда масса темного вещества Галактики за счет субзвезд может составлять до 40% от общей ее массы. Так, при стремлении γ к нулю долевое содержание субзвезд по массе может составлять проценты. Для значений $\gamma \approx -1$ и более (по модулю) содержание субзвезд может составлять 20–30% и более [75]. В этом случае число звезд и субзвезд могут сравняться.

На рис. 16 приведен спектр масс, вычисленный методом Паренаго [16] для всех звезд и звезд главной последовательности, расположенных ближе 10 пк (по версии каталога Захой [74] и вычисленным массам звезд [6]). Согласно этому спектру масс, средние массы всех звезд и звезд главной последовательности в этой области равны $\langle m/m_{\odot} \rangle = 0.42 \pm 0.04$ и $\langle m/m_{\odot} \rangle_{\text{гп}} = 0.40 \pm 0.04$, соответственно. Это соответствует средней плотности звездного вещества (исключая белые карлики) $\langle \rho \rangle_* = \bar{\rho}_* \langle m/m_{\odot} \rangle = 0.050 \pm 0.006 m_{\odot}/\text{пк}^3 = (5.37 \pm 0.40) \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$, где $\bar{\rho}_* = 0.12 \pm 0.01 \text{ зв/пк}^3$ — пространственная плотность звезд, вычисленная как среднее из значений, полученных при вычислении дифференциальных функций распределения абсолютных величин, масс, радиусов и металличностей, приведенных в этом разделе [9] и полученному в работе [3].

Согласно Бесселю и Стрингфеллоу, функция светимости самых слабых звезд главной последовательности оказывается гладкой, и из экстраполяции этой функции масс до нулевой массы не следует, что в субзвездах заключена большая масса [27]. Обзоры солнечной окрестности также не обнаружили существенного роста функции звездных масс в сторону меньших масс [52]. Более того, из анализа НФМ, вычисленной на основании наблюдательных данных 257 М-карликов ($8^m \leq M_V \leq 18.3^m$), обнаруженных с помощью Космического телескопа Хаббла, следует, что градиент функции масс достигает максимума при значении $0.43m_{\odot}$ [40, 72], после чего отмечается ее резкий спад. Такое поведение хорошо согласуется также с наземными фотометрическими исследованиями близких звезд, проведенными Стобай и др. [67].

Начальные спектры масс (НСМ), полученные для коричневых карликов, являющихся спутниками кратных звездных систем соответствует $\gamma = -1.2$ на интервале $(0.012...0.075)m_{\odot}$ (Цукерман и Сонг [78]), а не являющихся спутниками — $\gamma = -0.3$ для масс $(0.04...0.10)m_{\odot}$ (Аллен и др. [25]). Эти НСМ на указанных интервалах частично согласуются (на $\Delta m = (0.04...0.10)m_{\odot}$ [25]) с начальными ЗССМ Кроупа и Уэйднера [51]: $\gamma = -0.3$ на интервале $\Delta m = (0.01...0.08)m_{\odot}$; $\gamma = -1.3$ на $\Delta m = (0.08...0.5)m_{\odot}$; $\gamma = -2.3$ на $\Delta m = (0.5...1)m_{\odot}$; $\gamma = -2.7$ для $m > m_{\odot}$.

Полученному Захой для окрестностей Солнца лог-нормальному спектру масс на $\Delta m = (0.016...1.26)m_{\odot}$ (рис. 2), соответствует максимум на значении $0.5m_{\odot}$ и $\gamma = -1.32 - 0.98 \log(m/m_{\odot})$ [76]. Этот показатель степени находится в полном соответствии с функциями масс близких к Солнцу молодых звездных скоплений [4]. А именно, показатель наблюдаемых спектров масс $\gamma = -1 \pm 0.1$ встречается чаще всего и соответствует интервалу масс $0.4...0.6m_{\odot}$, для 13 анализируемых скоплений из 17. С другой стороны, показатель спектра масс Гоулда, Бакала и Флина [40] $\gamma = -2.33 - 3.64 \log(m/m_{\odot})$, хотя и согласуется с наклоном функции масс Солпитера [62] в ограниченном интервале масс ($\log(m/m_{\odot}) \approx 0$), но не согласуется с данными о показателях спектров масс звездных скоплений для интервала масс меньше солнечной.

Спектр радиусов и функция угловых диаметров звезд. Спектр радиусов звезд, находящихся ближе 10 пк, рассчитанный методом Паренаго [17] в предположении об их пространственном равномерном распределении, представлен в работе Захой [5] — рис. 1в. Этот спектр — $f(R)$ — соответствует интервалу $(0.1...2.8)R_{\odot}$ и коррелирует с построенным спектром масс ближайших звезд таким же методом, приведенным также в этой работе. Согласно этому спектру радиусов, средние радиусы звезд

всех светимостей и звезд главной последовательности в этой области равны $\langle R/R_{\odot} \rangle = 0.46 \pm 0.04$ и $\langle R/R_{\odot} \rangle_{\text{гн}} = 0.43 \pm 0.04$, соответственно.

Функция угловых диаметров ближайших звезд $\psi(\theta)$ (нормированная на 100%) на интервале $\Delta\theta = (0.00009 \div 0.02)''$ была также представлена в работе [5] как результат расчетов, проведенных в [4]. Эта функция распределения приведена на рис.3. Для ее расчета использовалась вышеприведенный спектр радиусов и равномерный закон пространственного распределения звезд ближе 10 пк. Рассчитанная функция распределения может быть, условно, разбита на три участка. На первом интервале $\Delta\theta = (0.00009 \dots 0.002)''$ значения функции распределения $\psi(\theta_i)$ резко уменьшаются от 72.6% до 1.14%. На втором интервале $\Delta\theta = (0.002 \dots 0.01)''$ — $\psi(\theta_i)$ уменьшается еще в 1140 раз, до значений 0.001%. Далее функция $\psi(\theta_i)$ уменьшается в 17 раз на третьем интервале $\Delta\theta = (0.01 \dots 0.02)''$, имея наименьшее значение $\psi(0.02'') = 0.00006\%$.

Аппроксимации ни спектра радиусов, ни функции угловых диаметров не проводились.

Функция металличности. Результаты расчетов функций металличностей $g([\text{Me}/\text{H}])$ по выборкам звезд гало ($[\text{Me}/\text{H}] = -1.2 \dots -0.5$), G-карликов ($[\text{Me}/\text{H}] = -0.5 \dots +0.1$) приведены в работе Сучкова [22] — рис. 4. Для построения функции металличностей близких звезд Захожаем и Шапаренко была использована выборка 502 F-, G-, K- карликов (с вычисленными металличностями по UVB- фотометрии [12]), находящихся в радиусе 30 пк от Солнца. Функция металличностей [13] была построена методом Паренаго [16] в предположении о равномерном распределении звезд в этой области. Она приведена на рис. 1г. 97% выборки близких к Солнцу F-, G-, K-карликов имеют металличности $[\text{Me}/\text{H}] = -0.4 \dots +0.1$. У функции металличности хорошо проявились три максимума ($[\text{Me}/\text{H}] = 0.0, -0.3, -0.6$) и два минимума ($[\text{Me}/\text{H}] = -0.2 \dots -0.5$). «Хвост» распределения в интервале значений $[\text{Me}/\text{H}] = [-0.9 \dots -1.2]$ составляют субкарлики. Второй максимум в распределении звезд типа RR Лиры, приведенной в работе [15], совпадает с первым максимумом построенной функции [13]. Как видно из сравнения рис. 1г и 4, максимумы функций металличностей для звезд диска Галактики (G-карлики) [22] и близких F-, G-, K-карликов [13] достигаются при одних и тех же значениях $[\text{Me}/\text{H}]$.

4. ВЫВОДЫ

1. Анализ связей между светимостью, эффективной температурой, массой, возрастом субзвезд и непрозрачностью вещества их атмосфер (1)–(2), полученных при построении субзвездных эволюционных моделей, позволил записать систему уравнений (6)–(7), связывающих все основные характеристики субзвезд.

2. Показано, что система уравнений (6)–(7) может быть применима и для физического обоснования связей между основными характеристиками звезд. Дан перечень статистических связей между основными характеристиками звезд, которые следуют из их общих связей.

3. Функция светимости на протяжении всего XX века была и остается одной из самых важных статистических характеристик ближайших звезд. До 1980-х гг. эта функция служила базой для анализа процессов звездообразования. В настоящее время ее вычисляют и используют, в основном, для определения спектров масс звезд и субзвезд.

4. Начальный спектр масс (НСМ) звезд и субзвезд, как самая важная функция распределения, несущая основную информацию о процессах звездообразования, остается неизвестной даже для окрестностей Солнца, в которых доступны для наблюдения самые маломассивные космические объекты. Полученные НСМ разными авторами существенно отличаются. Степенной и лог-нормальный законы распределения — наиболее распространенные функции, которыми аппроксимируют НСМ.

5. Существует полное согласие между функциями металличности, построенными для галактических гало и диска и звезд, находящихся ближе 30 пк от Солнца. Остается нерешенной проблема вычисления функции металличностей M- карликов, являющихся основной составляющей Галактики.

6. Спектр радиусов и функция угловых диаметров вычислены к настоящему времени в единственном варианте и только для ближайших звезд.

7. Функция распределения эффективных температур до настоящего времени не построена. Ее вычисление не представляет сложности построить, имея функции светимости и спектр радиусов звезд. С другой стороны, накопленный наблюдательный материал по определению T_{eff} прямыми методами гораздо больший, чем выборка звездных радиусов, полученная из прямых интерферометрических исследований. Следовательно, вычисление такой функции распределения позволило бы определить спектр радиусов звезд (а, возможно, и субзвезд) другим независимым методом.

8. Ни дифференциальная, ни интегральная функции распределения возрастов (как одной из основных характеристик) звезд и субзвезд ни разу не определялись. Такая ситуация сложилась, в первую очередь, из-за отсутствия каталогов, где бы содержалась эта важная характеристика. Необходимы новые подходы и идеи, которые бы позволили решить как проблему определения возрастов индивидуальных звезд и субзвезд, так и дальнейшую задачу — вычисления их функции возрастов.

1. Агекян Е.А. Теория вероятностей для астрономов и физиков. — М.: Наука, 1974. — 264 с.
2. Верецагин С.В., Чупина Н.В. Спектр масс околосолнечных окрестностей и звездное скопление UMa // Астрон. журн. — 1994. — **71**, № 1. — С. 72–77.
3. Захожай В.А. Функция светимости и пространственная плотность ближайших звезд // Астрометрия и астрофиз. — 1980. — № 42. — С. 64–69.
4. Захожай В.А. Статистические свойства ближайших звезд: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Л.: ГАО АН СССР, 1987. — 206 с.
5. Захожай В.А. Статистические свойства звезд и кратных систем в области 10 пк / В сб.: Астрономо-геодезические исследования: Близкие двойные и кратные звезды. — Свердловск: УрГУ, 1990. — С. 44–54.
6. Захожай В.А. Массы ближайших звезд // Кинем. и физ. неб. тел. — 1994. — **10**, № 2. — С. 68–73.
7. Захожай В.А. Функция масс звезд Галактики // Кинем. и физ. неб. тел. — 2000. — **16**, № 2. — С. 153–168.
8. Захожай В.А. Радиусы и спектры ближайших звезд // Кинем. и физ. неб. тел. — 2002. — **18**, № 6. — С. 535–552.
9. Захожай В.А. Статистические закономерности в звездных системах: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. — Харьков: ХНУ им. В.Н.Каразина, 2007. — 317 с.
10. Захожай В.А., Бабенко М.А. Околосолнечное звездно-субзвездное окружение. I. Местоположение в Галактике и каталоги // Вісник Астрон. школи. — 2012. — **8**, № 1. — С. 13–21.
11. Захожай В.А., Бабенко М.А. Околосолнечное звездно-субзвездное окружение. II. Классификация и определение основных характеристик // Вісник Астрон. школи. — 2012. — **8**, № 2. — С. 108–118.
12. Захожай В.А., Шапаренко Э.Ф. Металличности близких звезд // Кинем. и физ. неб. тел. — 1996. — **12**, № 2. — С. 20–29.
13. Захожай В.А., Шапаренко Э.Ф. Функция распределения металличности близких звезд // Кинем. и физ. неб. тел. — 1997. — **13**, № 6. — С. 63–66.
14. Ишханов Г.В. Функция светимости звезд умеренной и слабой светимости // Вестн. Ленингр. ун-та. — 1976. — № 7. — С. 151–153.
15. Марочник Л.С., Сучков А.А. Галактика. — М.: Наука, 1984. — 392 с.
16. Паренаго П.П. Исследования, основанные на сводном каталоге звездных параллакс ГАИШ // Тр. гос. астрон. ин-та им. П.К.Штернберга. — М., 1940. — **13**. — С. 59–114.
17. Паренаго П.П. Курс звездной астрономии. — М.: Гостехиздат, 1954. — 476 с.
18. Писаренко А.И., Яценко А.А., Захожай В.А. Модель эволюции субзвездных объектов // Астрон. журн. — 2007. — **84**, № 8. — С. 675–684.
19. Свечников М.А., Тайдакова Т.А. О зависимости масса-спектр для звезд главной последовательности // Астрон. журн. — 1984. — **61**, вып. 1. — С. 143–151.
20. Скало Д.М. Спектр звездных масс / В кн.: Протозвезды и планеты. Т. 1 / Под ред. Т.Герелса. — М.: Мир, 1982. — С. 295–320.
21. Старикова Г.А. Функция светимости и цвета звезд // Астрон. журн. — 1960. — **37**, вып. 3. — С. 476–491.
22. Сучков А.А. Галактики знакомые и загадочные. — М.: Наука, 1978. — 192 с.
23. Чандрасекар С. Введение в учение о строении звезд. — М.: ИЛ, 1950. — 476 с.
24. Шацова Р.Б. Выступление на совещании по вопросам космогонии // Труды второго совещания по вопросам космогонии (19–22 мая 1952 г.). — М.: изд. АН СССР, 1953. — С. 567–571.
25. Allen P.R., Koerner D.W., Reid I.N., et al. The Substellar Mass Function: A Bayesian Approach // Astrophys. J. — 2005. — **625**, Is. 1. — P. 385–397.
26. Astrophysics Data System. — URL: <http://adsabs.harvard.edu>
27. Bessel M.S., Stringfellow G.S. The faint end of the stellar luminosity function // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 1993. — **31**. — P. 433–471.
28. Bochanski J.J. Low-mass stars in the Sloan Digital Sky Survey: Galactic structure, kinematics, and the luminosity function // arXiv: 1012.1856v1 [astro-ph.SR] 8 Dec 2010.
29. Burrows A., Hubbard W.B., Lunine J.I., Liebert J. The Theory of Brown Dwarfs and Extrasolar Giant Planets // Rev. Mod. Phys. — 2001. — **73**. — P. 719–765.
30. Burrows A., Liebert J. The science of brown dwarfs // Rev. Mod. Phys. — 1993. — **65**, № 2. — P. 301–336.
31. Cayrel de Strobel G. The intrinsic width of the zero age main sequence // Astronomical papers dedicated to Bengt Stromgren; Proceedings of the Symposium, Copenhagen, Denmark, May 30–June 1, 1978. — Copenhagen, Copenhagen Univ. Observ., 1978. — P. 205–222.
32. Cervino M., Mas-Hesse J.M. Metallicity effects in star-forming regions // Astron. Astrophys. — 1994. — **284**, № 3. — P. 749–763.
33. Chabrier G., Baraffe I. Theory of Low-Mass Stars and Substellar Objects // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2000. — **38**. — P. 337–372.
34. Clayton D.D. Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis. — New York: McGraw-Hill, 1968. — 612 p.
35. De Boer K.S., Seggewiss W. Stars and Stellar Evolution. — Les Ulis: EDP Sci, 2008. — 333 p.

36. Demircan O., Kahraman G. Stellar mass-luminosity and mass-radius relations // *Astrophys. Sp. Sci.* — 1991. — **181**, № 2. — P. 313–322.
37. Gliese W. Catalogue of nearby stars. — Karlsruhe: Braun, 1969. — 118 p.
38. Gliese W. Smethell's stars nearer than 25 parsecs // *Astron. Astrophys. Suppl.* — 1981. — **44**. — P. 131–135.
39. Gliese W., Jahreiss H. Nearby star data published 1969–1978 // *Astron. Astrophys. Suppl.* — 1979. — **38**. — P. 423–448.
40. Gould A., Bahcall J.N., Flynn C. Disk M dwarf luminosity function from Hubble space telescope star counts // *Astrophys. J.* — 1996. — **465**, № 2. — P. 759–768.
41. Guseva N.G., Kolesnic L.N., Metreveli M.D. Stellar statistische Untersuchungen in der Sonnengebung // *Astron. Nachr.* — 1983. — **304**, Nr.1 — S. 41–44.
42. Henry T.J., McCarthy D.W. A systematic search for brown dwarfs orbiting nearby stars // *Astrophys. J.* — 1990. — **350**, № 1. — P. 334–347.
43. Hubbard W.B. Planetary Interiors. — New York: Van Nostrand Reinhold. — 1984. — 334 p.
44. Jahreiss H., Wielen R. Leuchtkraftfunktion und Massendichte der Sonnenabn Sterne // *Mitt. Astr. Gess.* — 1974. — Nr. 35. — S. 212–214.
45. Jet Propulsion Laboratory Solar System Dynamics. — URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov>
46. Kapteyn J.O. The luminosity curve // *Astron. Nachr.* — 1910. — **183**. — P. 312–331.
47. Kapteyn J.C., Van Rhijn P.J. On the Distribution of the Stars in Space Especially in the High Galactic Latitudes // *Astrophys. J.* — 1920. — **52**. — P. 23–38.
48. Karetnikov V.G. Relationships Between the Mass Radius Temperature and Luminosity of Stars in Eclipsing Binary Systems of Different Types // *Sov. Astron.* — 1991. — **35**, № 4. — P. 437–440.
49. Kroupa P. The Initial Mass Function of Stars: Evidence for Uniformity in Variable Systems // *Science.* — 2002. — **295**, Is. 5552. — P. 82–91.
50. Kroupa P., Tout C.A., Gilmore G. The distribution of low-mass stars in the Galactic disk // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1993. — **262**. — P. 545–587.
51. Kroupa P., Weidner C. Variations of the IMF // *Astrophys. Sp. Sci. Lib.* — 2005. — **327**. — P. 175–188.
52. Kuijken K. Dark matter in the Milky Way. — In *Stellar Populations* / Eds. P.C. van der Kruit and G.Gilmore. — IAU. Printed in the Netherlands. — 1995. — P. 195–204.
53. Luyten W.J. On distribution of absolute magnitudes in the vicinity of the Sun // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 1938. — **98**, № 8. — P. 677–680.
54. Luyten W.J. The stars of large proper motion and the luminosity function // *Publ. Obs. Minnesota, II.* — 1939. — № 7. — P. 121–159.
55. Luyten W.J. A new determination of the luminosity function // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 1968. — **139**. — P. 221–224.
56. McCuskey S.W. The stellar luminosity function // *Vistas in astronomy.* — 1965. — **7**. — P. 141–171.
57. National Space Science Data Center. — URL: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov>
58. Nelson L.A., Rappoport S.A., Joss P.C. The evolution of very low mass stars // *Astrophys. J.* — 1986. — **311**, № 1. — P. 226–240.
59. Reid I.N., Gizis J.E. Low-mass binaries and the stellar luminosity function // *Astron. J.* — 1997. — **113**, № 6. — P. 2246–2259.
60. Russell H.N. On the Relations Between Period, Luminosity, and Spectrum among Cepheids // *Astrophys. J.* — 1927. — **66**. — P. 122–134.
61. Salaris M., Cassisi S. *Evolution of Stars and Stellar Populations.* — England: John Wiley & Sons Ltd, 2005. — 389 p.
62. Salpeter E.E. The Luminosity Function and Stellar Evolution // *Astrophys. J.* — 1955. — **121**. — P. 161–167.
63. Seares F.H. The Form of the Luminosity Function // *Astrophys. J.* — 1924. — **59**. — P. 310–338.
64. Stevenson D.J. Brown and black dwarfs — Their structure, evolution and contribution to the missing mass // *Publ. Astron. Soc. Au.* — 1978. — **3**. — P. 227–228.
65. Stevenson D.J. High mass planets and low mass stars. — *Astrophysics of brown dwarfs. Proc. Second George Mason Fall Workshop in Astrophysics, Fairfax, Va., USA, 14–15 October 1985.* — Cambridge: Cambridge Univ. Press. — 1986. — P. 218–232.
66. Stevenson D.J. The search for brown dwarfs // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1991. — **29**. — P. 163–193.
67. Stobie R.S., Ishida K., Peacock J.A. Distance errors and the stellar luminosity function // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1989. — **238**, № 2. — P. 709–727.
68. The Centre de Donnees astronomiques de Strasbourg. — URL: <http://cdsweb.u-strasbg.fr>.
69. The Extrasolar Planets Encyclopaedia. — URL: <http://exoplanet.eu>
70. Tinsley B.M. Evolutions of the stars and gas in galaxies // *Fund. Cosm. Phys.* — 1980. — **5**, № 4. — P. 287–388.
71. Udry S., Eggenberger A., Mayor M., et al. Planets in multiple-star systems: properties and detections // *RevMexAA (Serie de Conferencias).* — 2004. — **21**. — P. 207–214.

72. *Van den Hoek L.B.* On the chemical and spectro-photometric evolution of nearby galaxies. — Astron. Institute 'Anton Pannekoek'. — Amsterdam, the Netherlands. — 1997. — 292 p.
73. *Vogt H.* Die Leuchtkraft-Masse-Beziehung der Sterne // Astron. Nachr. — 1928. — **233**. — P. 13–14.
74. *Zakhozhaĭ V.A.* Catalogue of stars within ten parsecs of the Sun. — 1996. — URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=V/101>.
75. *Zakhozhaĭ V.A.* Astrometrical method of searching for cool satellites of stars. Results and perspectives / In: Extension and connection of reference frames using ground based CCD technique. — Nikolaev, 2001. — P. 274–283.
76. *Zakhozhaĭ V.A.* Evidence of recent changes in the local Galactic IMF of stars and substars // Astrophys. Sp. Sci. — 2008. — **315**. — P. 13–19.
77. *Zapolsky H.S., Salpeter E.E.* The mass-radius relation for cold spheres of low mass // Astrophys. J. — 1969. — **158**. — P. 809–813.
78. *Zuckerman B., Song I.* The Minimum Jeans Mass, Brown Dwarf Companion IMF, and Predictions for Detection of Y-type Dwarfs // Astron. Astrophys. — 2009. — **493**, Is. 3. — P. 1149–1154.

Поступила в редакцию 16.08.2012