

Определение кинетических энергий звезд по данным Hipparcos

А.С.Цветков А.С.Рыбинцев

5 августа 2002 г.

Аннотация

Звезды поздних спектральных классов главной последовательности имеют собственные движения, которые в несколько раз больше, чем собственные движения у звезд ранних спектральных классов. Цель работы – объяснить различие наблюдаемых собственных движений звезд, принадлежащих разным участкам диаграммы Герцшпрунга-Рессела, разбросом масс этих звезд, в то время как их средние кинетические энергии примерно одинаковы.

Содержание

1	Введение	1
2	Оценка пространственной скорости звезд	3
2.1	Наблюдательный материал	3
2.2	Остаточные пространственные скорости звезд	5
3	Кинетические энергии звезд	8
3.1	Массы звезд и их разброс	8
3.2	Результаты	8
4	Заключение	11

1 Введение

Завершение космической миссии Hipparcos вновь обратило внимание астрономической общественности к задачам звездной кинематики. Предыдущий всплеск работ такого рода приходился на 30-е годы XX века, когда появился массовый каталог собственных движений GC [1]. Основное отличие каталога Hipparcos от всех предыдущих астрометрических каталогов заключается в наличии индивидуальных параллаксов звезд. Абсолютная точность параллаксов составляет около 1 mas, что дает знание расстояний

до половины звезд Hipparcos (50 000) с относительной точностью лучше 25% [3]. Такой наблюдательный материал дает возможность ставить такие звездно-кинематические задачи, решение которых раньше не представлялось возможным.

Основные направления в исследованиях, посвященных кинематике собственных движениях звезд каталога Hipparcos, были заданы на первом международном симпозиуме, проходившем в Венеции в 1997 г. В частности, затрагивался вопрос об определении средней плотности вещества на основе анализа собственных движений звезд класса F [4], а также проводилось исследование, посвященное скорости убегания в окрестности Солнца [5].

Наша работа тесно связана с этими двумя исследованиями. В ней производится попытка определить среднюю кинетическую энергию стохастического движения, приходящуюся на каждую звезду в окрестности Солнца в пространстве.

Из исследований в области звездной кинематики известно, что звездам поздних спектральных классов присущи большие собственные движения, нежели звездам ранних спектральных классов. Существует достаточно много различных гипотез, которые объясняют этот феномен. Одна из них заключается в том, что звезды поздних классов обладают меньшей массой, чем ранних классов, и поэтому имеют высокие скорости. Некоторые теоретические основы этого предположения можно найти в звездной динамике, которая для описания больших систем звезд прибегает к понятию "звездного газа". Использование этого понятия – вынужденная мера, поскольку описать гравитационное взаимодействие большого ансамбля звезд – трудоемкая и, часто, просто невыполнимая задача. Однако звездный газ не является полным аналогом идеального газа в термодинамике. В последнем передача энергии, вследствие которой атомы газа выравнивают свою кинетическую энергию, происходит за счет абсолютно упругих соударений. В случае звездного газа такой механизм отсутствует. В процессе длительной эволюции звездной системы в принципе не исключается обмен энергиями за счет гравитационного взаимодействия. Если такой механизм возможен, можно ожидать, что в звездной системе, существующей продолжительное время, должно наступить динамическое равновесие, характеризующееся некоторым средним значением кинетической энергии звезды.

Каталог Hipparcos, содержащий индивидуальные параллаксы звезд, позволяет оценить тангенциальную скорость каждой звезды. Сопоставляя данные Hipparcos с известными оценками звездных масс можно попытаться определить кинетические энергии звезд.

Цель нашей работы – объяснить различие остаточных (после вычета действий стандартных кинематических эффектов) собственных движений звезд разных спектральных классов различием масс звезд при примерно одинаковой их кинетической энергии.

2 Оценка пространственной скорости звезд

2.1 Наблюдательный материал

В этом разделе мы использовали в качестве основного наблюдательного материала близкие ($r < 250$ пк) звезды каталога Hipparcos [2].

Очевидный наблюдательный факт заключающийся в том, что звезды поздних спектральных классов обладают значительными собственными движениями по сравнению со звездами средних и ранних спектральных классов, отображен в таблице 1. Для ее построения выбирались звезды главной последовательности. Для всех звезд каждого спектрального класса вычислялся средний модуль собственного движения.

Таблица 1: Средний модуль собственного движения для звезд главной последовательности, находящихся на удалений до 250 пк.

Спектральный класс	Средний модуль собственного движения в "/250 лет
B	2.33 ± 2.45
A	3.03 ± 3.72
F	5.88 ± 6.74
G	10.8 ± 14.3
K	17.2 ± 25.3
M	44.6 ± 60.7

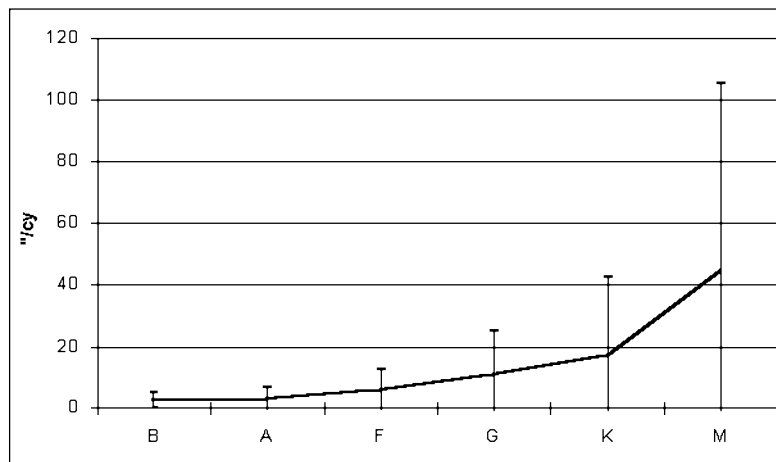


Рис. 1: Зависимость модуля собственного движения от спектрального класса для звезд главной последовательности, находящихся ближе 250 пк.

Анализ таблицы 1 показывает систематический рост как модуля, так и дисперсии собственного движения. Модуль собственного движения для звезд класса М почти в 20 раз больше, чем у звезд класса В, а разброс собственных движений больше, чем в 24 раза соответственно. Рисунок 1 иллюстрирует это обстоятельство. Именно только такая картина могла наблюдаться в догиппархосовскую эпоху.

Если бы расстояния до звезд не были бы известны (или известны приблизительно), можно было бы предположить, что за счет наблюдательной селекции звезды класса М в среднем находятся ближе поскольку они слабые, а звезды других спектральных классов – дальше, поэтому их собственные движения менее заметны.

Знание точных расстояний до звезд позволяет проверить эту гипотезу. Действительно, используя параллаксы каталога Hipparcos, мы имеем возможность оценить тангенциальные скорости звезд:

$$V_{\tau} = kr\mu, \quad (1)$$

здесь

$k = 0.0474$ – множитель перехода от размерности " /100 лет к км/с;

r – расстояние до звезды в пк;

$\mu = \sqrt{(\mu_{\alpha} \cos \delta)^2 + \mu_{\delta}^2}$ – полное собственное движение звезды в " /100 лет.

Таблица 2: *Средняя тангенциальная скорость звезд главной последовательности, удаленных на расстояние менее 250 пк.*

Спектральный класс	Средняя тангенциальная скорость в км/с
В	16.9 ± 13.8
А	19.1 ± 15.6
F	28.3 ± 23.3
G	40.3 ± 34.0
K	41.7 ± 37.2
M	43.5 ± 38.2

Наглядное представление о поведении тангенциальных скоростей дает рис. 2, построенный по данным таблицы 2.

Анализ этих данных показывает, что в целом эффект увеличения тангенциальной скорости при продвижении к поздним спектральным классам выражен не так четко по сравнению с аналогичным эффектом для собственных движений, однако различие тангенциальных скоростей все же значительно и достигает 2.5 раз, а среднеквадратичные отклонения тангенциальных скоростей отличаются почти 3 раза. Таким образом можно констатировать, что большие собственные движения звезд спектральных классов К, М объясняются близостью этих звезд лишь частично. Переход от

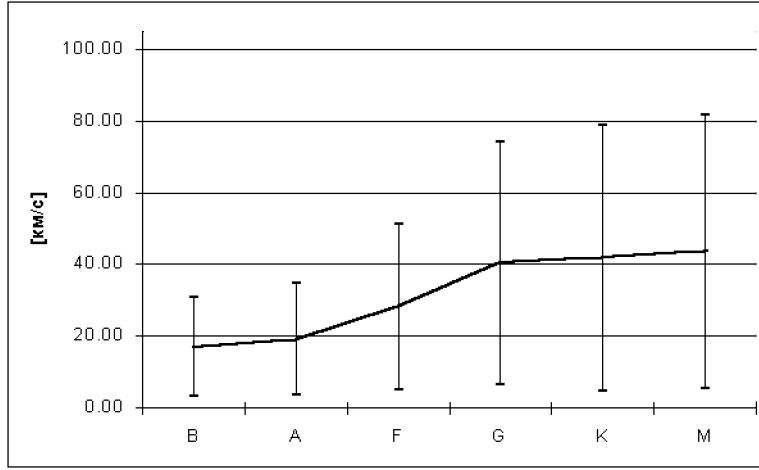


Рис. 2: Зависимость тангенциальной скорости от спектрального класса.

собственных движений к лучевым скоростям показывает, что звезды поздних классов обладают не только большими собственными движениями, но и большими скоростями, чем звезды ранних спектральных классов.

2.2 Остаточные пространственные скорости звезд

К сожалению, каталог Hipparcos не содержит данные о лучевых скоростях звезд и не дает возможности получить пространственные скорости каждой звезды в отдельности. Однако мы можем статистически оценить полную скорость для большого числа звезд. Опишем кратко алгоритм получения среднего модуля остаточной пространственной скорости для групп звезд.

1. Звезды каталога Hipparcos были разбиты на пять шаровых слоев с шагом 50 пк. Для каждого слоя вычислялись методом наименьших квадратов параметры стандартной звездно-кинематической модели:

$$\mu_l \cos b = \frac{1}{kr} (V_x \sin l - V_y \cos l) + \frac{A}{k} \cos 2l \cos b + \frac{B}{k} \cos b, \quad (2)$$

$$\mu_b = \frac{1}{kr} (V_x \sin b \cos l + V_y \sin b \sin l - V_z \cos b) + \frac{A}{k} \sin 2l \sin b. \quad (3)$$

Здесь

V_x, V_y, V_z — компоненты вектора движения Солнца,
 A, B — постоянные Орта,

- k – множитель перехода размерностей,
если собственные движения выражены в "/100 лет,
а постоянные Оорта в км/с · кпк⁻¹, то $k = 0.0474$.

Значения параметров для звезд различных расстояний приведены в таблице 3.

Таблица 3: *Параметры стандартной кинематической модели.*

r [пк]	V_x [км/с]	V_y [км/с]	V_z [км/с]	A [км/с · Кпк ⁻¹]	B [км/с · Кпк ⁻¹]
0 – 50	11.6 ± 0.5	19.7 ± 0.5	3.7 ± 0.5	33.4 ± 28.5	12.4 ± 22.3
50 – 100	12.1 ± 0.3	22.7 ± 0.3	7.5 ± 0.3	18.1 ± 5.4	-14.0 ± 4.4
100 – 150	9.8 ± 0.3	18.0 ± 0.3	6.7 ± 0.3	8.2 ± 2.7	-8.7 ± 2.2
150 – 200	9.7 ± 0.3	16.7 ± 0.3	6.9 ± 0.3	9.7 ± 2.0	-12.6 ± 1.5
200 – 250	9.6 ± 0.3	16.6 ± 0.3	6.3 ± 0.3	13.6 ± 1.7	-15.3 ± 1.3

2. Для каждого шарового слоя мы вычитали действие стандартных кинематических эффектов из индивидуальных собственных движений звезд, то есть получали остаточные (residual) собственные движения $\mu_l \cos b^*$ и μ_b^* .

$$\mu_l \cos b^* = \mu_l \cos b - \frac{1}{kr} (V_x \sin l - V_y \cos l) + \frac{A}{k} \cos 2l \cos b + \frac{B}{k} \cos b, \quad (4)$$

$$\mu_b^* = \mu_b - \frac{1}{kr} (V_x \sin b \cos l + V_y \sin b \sin l - V_z \cos b) + \frac{A}{k} \sin 2l \sin b. \quad (5)$$

3. По остаточным собственным движениям определяли индивидуальные остаточные тангенциальные скорости по формуле 1.
4. Для каждого спектрального класса вычислялась средняя остаточная тангенциальная скорость звезд.
5. На последнем этапе мы вычисляли пространственные скорости группы звезд. Из теории вероятностей известно [6], что математическое ожидание проекции единичного произвольно ориентированного отрезка на плоскость есть $\pi/4$. Тангенциальная скорость есть проекция полной скорости звезды на плоскость, перпендикулярную лучу зрения, в силу этого пространственная скорость звезд может быть оценена как

$$\langle V \rangle = \frac{4}{\pi} \langle V_t \rangle. \quad (6)$$

Таблица 4: Значения средней остаточной пространственной скорости звезд главной последовательности, находящиеся ближе 250 пк.

Спектральный класс	$\langle V \rangle$ [км/с]
B	21.11 ± 17.51
A	24.27 ± 19.79
F	35.92 ± 29.61
G	51.20 ± 43.26
K	52.98 ± 47.25
M	55.35 ± 48.51

Значения средней пространственной скорости для звезд главной последовательности, полученные этим методом, показаны в таблице 4.

Данные этой таблицы иллюстрируются рисунком 3. Как мы видим, вычитание действий стандартных кинематических эффектов практически не изменило ход кривой роста скорости по сравнению с рис. 2. Это говорит о том, что пекулярная скорость звезд является главной составляющей собственного движения. При переходе от класса F к классу G наблюдается резкий рост остаточной пространственной скорости примерно в два раза. Изменение кинематических характеристик в этом диапазоне спектральных классов было отмечено еще Паренаго [7].

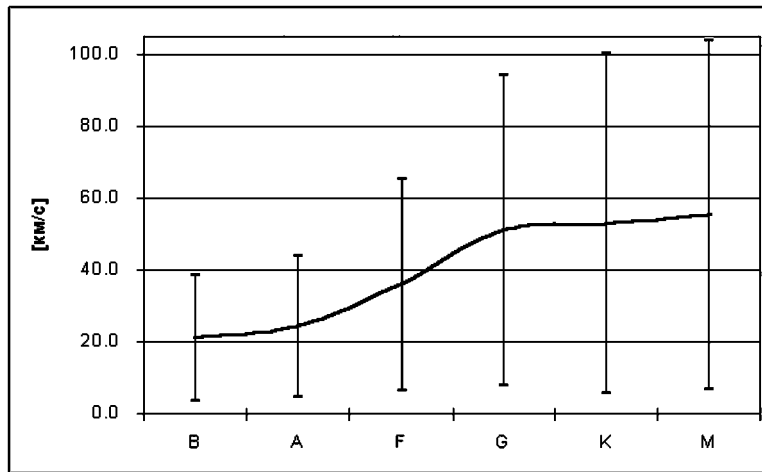


Рис. 3: Зависимость остаточной пространственной скорости звезд главной последовательности, находящиеся ближе 250 пк, от спектрального класса.

3 Кинетические энергии звезд

3.1 Массы звезд и их разброс

Существуют разные гипотезы, которые пытаются объяснить систематическое различие скоростей звезд, принадлежащих различным участкам диаграммы Герцшпрунга-Рессела. В некоторые из них считается, что разница в скоростях объясняется различной эволюцией рассматриваемых звезд. Но почему же тогда звезды столь разных эволюционных путей оказались в одной области пространства?

Мы решили рассмотреть гипотезу так называемого "звездного газа", которую предложили еще Паренаго [7] и Огородников [8]. В этом случае следует ожидать нормального распределения не самих пространственных скоростей, но кинетических энергий звезд, подобно распределению по энергиям молекул обычного газа. Разница состоит в том, что обмен энергиями в обычном газе происходит за счет соударений, а в звездном газе, видимо, за счет гравитационного влияния звезд друг на друга [9].

Для нахождения кинетических энергий звезд определенных спектральных классов необходимо знать их средние пространственные скорости $\langle V \rangle$ и массы M . В этом случае мы сможем оценить среднюю кинетическую энергию $\langle K \rangle$ по следующей формуле:

$$\langle K \rangle = \frac{M \langle V \rangle^2}{2}. \quad (7)$$

Метод оценки средних пространственных скоростей был описан в предыдущей главе. Рассмотрим подробнее вопрос о массах звезд.

Первоначально нами использовались единичные сведения о массах звезд и полученные из диаграммы соотношения "масса-светимость-[10]. К сожалению, такой подход не дает возможности оценить реальную дисперсию масс в пределах одного спектрального класса.

Однако, нам удалось в интернете найти каталог звездных масс (Беликов А.Н [11]). Он содержит массы компонентов более, чем для трехсот двойных систем. При этом все определения масс получены прямыми динамическими методами. Данные каталога позволили оценить разброс масс для спектральных групп, поскольку для звезд одного и того же спектрального класса и даже подкласса имеется несколько определений масс. Это обстоятельство позволило построить таблицу 5.

Данные таблиц 4 и 5 использовались для вычисления кинетических энергий звезд.

3.2 Результаты

Основные результаты представлены в таблицах 6 и 7. Здесь использовались следующие обозначения (все величины представлены со среднеквадратичным отклонением):

Таблица 5: Средние массы и их разброс в единицах масс Солнца

Спектральный класс	Массы звезд	
	главной последовательности	гигантов
B	7.84 ± 4.69	
A	2.09 ± 0.65	
F	1.38 ± 0.51	
G	1.01 ± 0.31	2.43 ± 0.53
K	0.85 ± 0.43	1.17 ± 0.85
M	0.43 ± 2.80	

- $B - V$ – среднее значение показателя цвета для данной группы звезд;
 $\langle V \rangle$ – оценка пространственной скорости группы звезд в введенных нами солнечных единицах (одна единица = 21 км/с – среднее движение Солнца относительно местного стандарта покоя);
 M – среднее значение массы в единицах масс Солнца;
 K – оценка кинетической энергии (кинетическая энергия Солнца при принятых единицах измерения массы и скорости будет равна $\frac{1}{2} (4.4 \cdot 10^{38} \text{Дж})$);
 N – количество звезд в группе.

Как можно заметить, для представления скорости звезд и их кинетических энергий мы ввели специальные единицы измерения.

Отметим, что в этих таблицах для звезд главной последовательности, ввиду крайне малого числа звезд, не представлен спектральный класс O, а для гигантов не представлен спектральный класс M, из-за отсутствия данных для масс звезд этого типа.

Таблица 6: Кинетические энергии звезд главной последовательности.

Sp	$\langle V \rangle$	$B - V$	M	K	N
B	0.00 ± 0.15	1.01 ± 0.83	7.84 ± 4.69	3.96 ± 6.99	2234
A	0.19 ± 0.13	1.16 ± 0.94	2.09 ± 0.65	1.40 ± 2.32	10538
F	0.47 ± 0.10	1.71 ± 1.41	1.38 ± 0.51	2.02 ± 3.42	20727
G	0.69 ± 0.15	2.44 ± 2.06	1.01 ± 0.31	2.99 ± 5.14	14531
K	1.00 ± 0.23	2.52 ± 2.25	0.85 ± 0.43	2.71 ± 5.03	6158
M	1.42 ± 0.21	2.64 ± 2.31	0.43 ± 2.80	1.50 ± 10.1	1037

Таблицы 6, 7 показывают, что средние значения кинетических энергий для звезд главной последовательности весьма близки, а энергии гигантов сравнимы с энергиями звезд главной последовательности. Эти выводы наглядно подтверждаются рис. 4 и 5

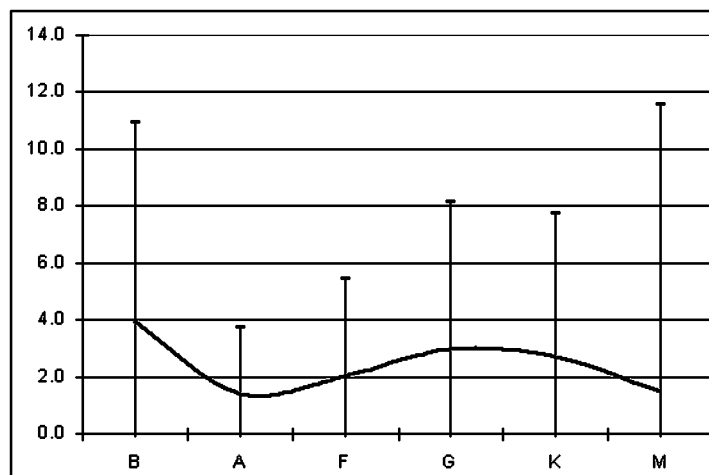


Рис. 4: Зависимость кинетической энергии звезд главной последовательности от спектрального класса.

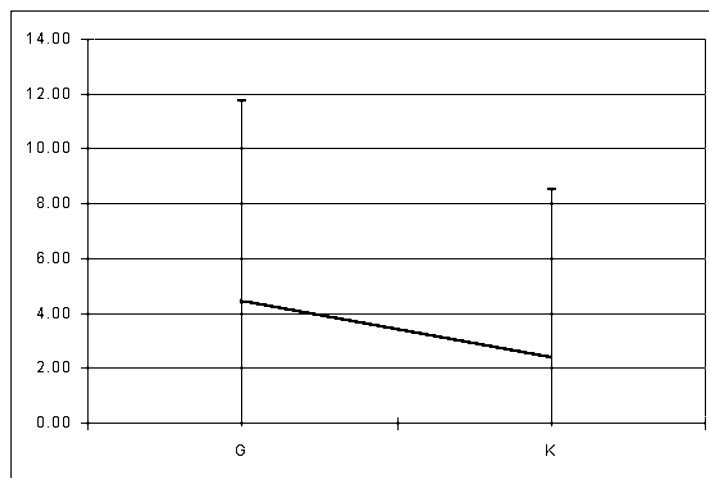


Рис. 5: Зависимость кинетической энергии звезд гигантов от спектрального класса.

Таблица 7: *Кинетические энергии звезд-гигантов.*

Sp	$\langle V \rangle$	$B - V$	M	K	N
G	1.03 ± 0.07	1.91 ± 1.56	2.43 ± 0.53	4.43 ± 7.30	1526
K	1.17 ± 0.16	2.01 ± 1.38	1.17 ± 0.85	2.37 ± 6.17	7085

4 Заключение

Основной вывод нашей работы заключается в том, что различие кинетических энергий звезд, занимающих разное положение на диаграмме Герцшпрунга-Рессела, невелико по сравнению с разбросом их пространственных скоростей и, тем более, собственных движений. Можно говорить о том, что звезды околосолнечного пространства обладают примерно равной кинетической энергией. Если отбросить крайние спектральные классы, то можно заметить, что средние кинетические энергии звезд спектральных классов А, F, G, К отличаются не более, чем в полтора раза. Изменяется и сам ход кривой рис. 4 по сравнению с рис. 2, 3. Отсутствует систематический рост по мере продвижения вдоль главной последовательности. Оставшееся небольшое различие кинетических энергий звезд может объясняться неточностью знания масс звезд или какими-то другими причинами и нуждается в дальнейшем изучении.

На наш взгляд работа имеет два очевидных продолжения:

- Использование индивидуальных лучевых скоростей для определения модуля пространственной скорости звезды. К сожалению только 10% звезд Hipparcos имеют измеренные лучевые скорости, тем не менее 10 000 звезд – это достаточный материал для выполнения такой работы.
- Исследование профиля разброса кинетической энергии для звезд отдельных спектральных классов. Его вид мог бы показать является ли распределение звезд по кинетическим энергиям равновесным или, напротив, нестационарным.

Исследования в этих направлениях будут проведены в ближайшем будущем.

Список литературы

- [1] *Boss B.*, General Catalogue of 33342 stars for the epoch 1950.0, Washington, 1937.
- [2] *Mignardetal.*, HIPPARCOS and TYCHO Catalogues, ESA, 1997.

- [3] *F. Mignard*, Astrometric Properties of the Hipparcos Catalogue, Proceedings from the Hipparcos Venice '97 symposium.
- [4] *H.-A. Pham*, Estimation of the Local Mass Density from an F-Star Sample Observed by Hipparcos, Proceedings from the Hipparcos Venice '97 symposium.
- [5] *L. Meillon et al.*, First Steps Toward the Determination of the Escape Velocity in the Solar Neighbourhood, Proceedings from the Hipparcos Venice '97 symposium.
- [6] *Агекян Т.А.*, Теория вероятностей для астрономов и физиков. М.: Наука, 1974.
- [7] *Паренаго П.П.*, Курс звездной астрономии. М.: Гостехиздат, 1954.
- [8] *Огородников К.Ф.*, Динамика звездных систем. М.: Физматгиз, 1958.
- [9] *Зонн В., Рудницкий К.*, Звездная астрономия. М.: ИЛ, 1959.
- [10] *Куликовский К.Ф.*, Звездная астрономия. М.: Наука, 1985.
- [11] *Belikov A.N.*, Stellar Mass Catalogue. Preliminary Version. Bull. Inf. CDS 47, 9 (1995)