

УДК 524.62-32

С. П. Рыбка, А. И. Яценко

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27

Идентификация гигантов «красного сгущения» по фотометрическим данным 2MASS

Инфракрасная J, K-фотометрия каталога 2MASS использована для отбора звезд-гигантов «красного сгущения», определения расстояний до них и межзвездного поглощения света. Проанализированы диаграммы «цвет — звездная величина», построенные для 10 областей неба, которые расположены преимущественно вблизи плоскости Галактики. Методом максимального правдоподобия определены значения параметров распределения численности гигантов «красного сгущения» по их наблюдаемым показателям цвета J – K, и на основе этих параметров произведен отбор звезд такого типа до $K = 11^m$. По покраснению отобранных звезд найдены оценки поглощения света в полосе K в направлении исследуемых областей. Величина поглощения и его изменения с галактической широтой и долготой согласуются с поглощением, вычисленным по модели Арену и др.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ГІГАНТІВ «ЧЕРВОНОГО ЗГУЩЕННЯ» ЗА ФОТОМЕТРИЧНИМИ ДАНИМИ 2MASS, Рыбка С. П., Яценко А. І. — Інфрачервону J, K-фотометрію каталогу 2MASS використано для відбору зір-гігантів «червоного згущення», визначення відстаней до них та міжзоряного поглинання світла. Проаналізовано діаграми «колір — зоряна величина», побудовані для 10 областей неба, розташованих переважно біля площини Галактики. Методом максимальної вірогідності визначені значення параметрів розподілу чисельності гігантів «червоного згущення» за їхніми спостережуваними показниками кольору J – K, і на основі цих параметрів проведено відбір зір такого типу до $K = 11^m$. За почервонінням відібраних зір знайдено оцінки поглинання світла у смузі K в напрямку досліджуваних областей. Величина поглинання та його зміни з галактичною широтою і довготою відповідають поглинанию, обчисленому по моделі Арену та ін.

THE IDENTIFICATION OF RED CLUMP GIANTS FROM 2MASS PHOTOMETRY, by Rybka S. P., Yatsenko A. I. — 2MASS J, K-photometry was used to select red clump giants and determine distances and interstellar extinction. We analyzed color-magnitude diagrams constructed for 10 sky regions which are mostly located near the Galaxy plane. The application of maximum-likelihood procedure to determine parameters of observed J–K colour distribution of red clump giants resulted in the isolation of this type stars brighter than $K = 11^m$. Based on the reddening of extracted stars, K-band extinction was determined in the direction of the regions under investigation. The extinction and its variations with galactic longitude and latitude agree with the extinction based on the model by Arenou et al.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последнего десятилетия гиганты «красного сгущения» (КС) активно используются в исследовании кинематики и структуры Галактики, что вызвано их характерными физическими свойствами. Благодаря достаточно высокому и близкому по значению светимостям они признаны хорошими индикаторами расстояний, так как первое свойство их светимостей гарантирует измерение расстояний далеко от Солнца, а второе — надежность полученных результатов. Кроме того, гиганты КС сравнительно легко отождествить на инфракрасных диаграммах Герцшпрунга — Рессела, где они выделяются среди окружающих звезд повышенной плотностью точек. Использование инфракрасного диапазона излучения вместо визуального дает лучшую концентрацию точек для гигантов КС и позволяет существенно ослабить влияние межзвездного поглощения света.

В нашей работе исследуются фотометрические данные 2MASS [10] с целью отбора гигантов КС и расширения известного каталога [2] за счет более слабых объектов. Современная версия каталога содержит яркие звезды-кандидаты КС, выделенные из «Tycho-2» до $K = 8.2^m$. В новую его версию планируется включить звезды до $K = 11^m$. Указанное расширение существенно увеличит объем пространства, в котором находятся исследуемые звезды, и при наличии собственных движений позволит изучать их кинематику в радиусе 3 кпк от Солнца, тогда как ранее это было возможно лишь до 1 кпк [3].

ВЫДЕЛЕНИЕ ГИГАНТОВ КС ИЗ КАТАЛОГА 2MASS

Известные методы идентификации гигантов КС основаны на анализе диаграмм Герцшпрунга — Рессела, которые построены с использованием фотометрического материала в ближней инфракрасной области спектра. Источником такого материала служит каталог 2MASS, который покрывает все небо и содержит 0.5 миллиарда звезд с однородными и высокоточными звездными величинами J, H, K (предельные значения $J = 17.1^m, H = 16.4^m, K = 14.3^m$, средняя погрешность $0.02^m, 0.03^m$,

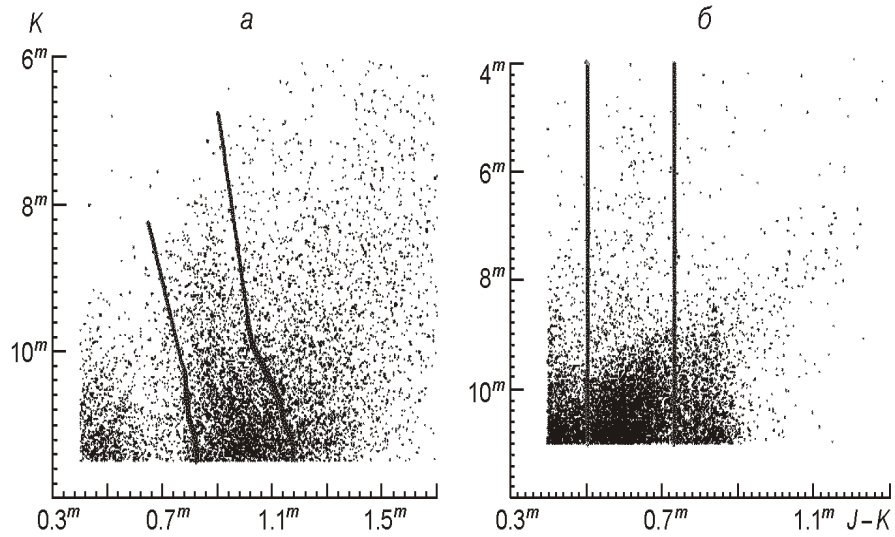


Рис. 1. Диаграмма «показатель цвета — звездная величина» по данным каталога 2MASS для двух галактических полей: *a* — с большим поглощением ($l = 155^\circ$, $b = 1^\circ$), *б* — с малым поглощением ($l = 65^\circ$, $b = 45^\circ$). Сплошными линиями указаны границы отбора звезд-кандидатов красного гущения

0.02^m соответственно). Недавно в работе Лопеса-Корредойры и др. [8] был разработан метод выделения звезд-гигантов КС исключительно по фотометрическим критериям. Для этого использовались глубокие инфракрасные диаграммы «цвет — звездная величина» (CMD), построенные по данным каталога 2MASS для отдельных небольших областей неба вблизи галактической плоскости. Определяется также межзвездное поглощение света в направлении исследуемых областей. На рис. 1 показаны примеры таких диаграмм для двух областей с большим ($l = 155^\circ$, $b = 1^\circ$) и малым поглощением ($l = 65^\circ$, $b = 45^\circ$). Сплошными линиями выделены области, в которых отобраны кандидаты КС методом Лопеса-Корредойры и др. [8]. В отличие от этого метода классический метод [1] выделения отдельных типов звездного населения, в том числе и гигантов КС, базируется на анализе диаграмм, где сопоставляются цвета и «приведенные собственные движения» звезд. Последние представляют комбинацию собственных движений и звездных величин звезд и, как было показано еще Льюитеном, являются кинематическим аналогом абсолютной звездной величины. Очевидно, что метод Лопеса-Корредойры и др. в отличие от классического полностью свободен от эффекта селекции по собственным движениям. Однако при помощи последнего лучше разделяются гиганты КС и карлики одинакового цвета, а присущий ему эффект селекции по собственным движениям не имеет определяющего значения.

Чтобы протестировать метод выделения гигантов КС исключительно по фотометрическим критериям, мы проанализировали CM-диаграммы ($J - K$, m_K), построенные по данным каталога 2MASS

Таблица 1. Оценки параметров CI_{RC} и RC распределения звезд-кандидатов КС по показателям цвета $J - K$, найденные для двух групп звезд в каждой из 10 областей неба

l_c	b_c	S, \square	K	N	N_{RC}	CI_{RC}	RC
43	+1	10	9.0— 9.5 ^m	851	320	1.08 ^m	0.10 ^m
43	+1	10	10.5—11.0	2425	2010	1.26	0.15
43	-1	10	9.0— 9.5	844	382	1.06	0.11
43	-1	10	10.5—11.0	2401	1988	1.22	0.17
155	+1	20	9.0— 9.5	628	255	0.88	0.09
155	+1	20	10.5—11.0	2047	1625	0.99	0.12
155	-1	19	9.0— 9.5	545	245	0.93	0.10
155	-1	19	10.5—11.0	1944	1532	1.07	0.14
155	+3	27	9.0— 9.5	799	375	0.92	0.12
155	+3	27	10.5—11.0	2718	2156	0.93	0.12
155	-3	26	9.0— 9.5	787	443	0.88	0.10
155	-3	26	10.5—11.0	2377	1954	0.94	0.13
44	+14	35	9.0— 9.5	882	545	0.74	0.07
44	+14	35	10.5—11.0	2794	2211	0.74	0.08
44	-14	30	9.0— 9.5	750	553	0.75	0.08
44	-14	30	10.5—11.0	2797	2220	0.72	0.09
65	+45	500	9.0— 9.5	541	350	0.64	0.07
65	+45	500	10.5—11.0	3016	2255	0.60	0.06
65	-45	500	9.0— 9.5	662	448	0.66	0.06
65	-45	500	10.5—11.0	2766	2088	0.61	0.06

Примечание: l_c, b_c — долгота и широта центра области, S — площадь области в квадратных градусах, N, N_{RC} — количество всех исследуемых звезд и кандидатов КС

для 10 областей неба на разных галактических широтах. При этом использовались точные J, K -величины для звезд ярче $m_K = 11^m$ с показателями цвета $J - K > 0.40^m$, которые имеют точную J, K -фотометрию. Галактические долготы и широты l_c, b_c центров выбранных областей и их размеры S вместе с другими данными приведены в табл. 1. Ранние К-гиганты или гиганты КС как звезды в основном одного спектрального класса (приблизительно одинаковой абсолютной звездной величины и цвета) образуют на СМ-диаграммах собственную достаточно широкую полосу вследствие комбинации эффектов расстояния и поглощения света. Если последний эффект доминирует, то эта полоса проходит на СМ-диаграмме по диагонали, а при низком поглощении она расположена почти вертикально (рис. 1).

Главной задачей, возникающей при идентификации гигантов КС, является локализация области на СМД, где сосредоточено их преобладающее большинство, а примесь звезд других типов, преимущественно карликов и М-гигантов, незначительна. Способ решения этой задачи подробно изложен в работах [6, 8]. Для выбора границ по показателям цвета $J - K$ в работах [6, 8] анализируются распределения звезд по $J - K$ в узких интервалах m_K с использованием ряда горизонтальных разрезов участка СМД, где должно находиться большинство гигантов КС. Полученные распределения аппроксимируются кривой Гаусса,

после чего определяется положение пика этих распределений для каждого интервала блеска звезд. Поскольку предполагается, что гиганты КС доминируют среди других типов звезд в исследуемом участке СМД, найденные положения пиков используются для представления наиболее вероятного трека ядра гигантов КС на СМД в виде некоторой “средней линии”. В силу имеющейся дисперсии показателей цвета гигантов КС и влияния поглощения света границы для их отбора устанавливаются на определенном расстоянии слева и справа от указанной линии. Вблизи плоскости Галактики такое расстояние составляет 0.2^m , тогда как на промежуточных и высоких широтах — 0.1^m . Указанная процедура выбора границ для выделения гигантов КС повторяется несколько раз до достижения наилучшего приближения распределения наблюдаемых показателей цвета гауссовой кривой.

Критическим аспектом описываемого метода является увеличивающаяся с ослаблением блеска объектов и ростом галактической широты доля карликов в составе выделенных звезд. В работах [6, 8] показано, что в случае использования звезд ярче 13^m вблизи галактической плоскости и ярче 10^m на высоких широтах примесь карликов оказывается минимальной и не превышает 10 %.

Перечисленные выше основные положения метода идентификации гигантов КС были использованы при выполнении данной работы. Однако для более объективного выделения гигантов КС мы несколько изменили процедуру их отбора по показателям цвета $J - K$. Мы рассматривали участки СМД, где должны располагаться не только гиганты КС, но и звезды ветви гигантов (ВГ). Звезды слабее 9^m , находящиеся в пределах этих участков, были разделены на четыре группы в зависимости от их блеска: $9.0 - 9.5^m$, $9.5 - 10.0^m$, $10.0 - 10.5^m$ и $10.5 - 11.0^m$. Затем полученные для каждой из групп распределения звезд по показателям цвета $J - K$ были представлены суммой двух гауссовых распределений с различными параметрами:

$$F(CI) = F_{RC}(CI) + F_{GB}(CI),$$

$$F_{RC}(CI) = [N_{RC} / (\sigma_{RC}^2)] \exp[-0.5(CI - CI_{RC})^2 / \sigma_{RC}^2],$$

$$F_{GB}(CI) = [N_{GB} / (\sigma_{GB}^2)] \exp[-0.5(CI - CI_{GB})^2 / \sigma_{GB}^2].$$

Здесь CI_{RC} , CI_{GB} , σ_{RC}^2 , σ_{GB}^2 — средние значения и дисперсии показателей цвета звезд “красного сгущения” и ветви гигантов соответственно; N_{RC} , N_{GB} — их количество. Значения пяти независимых параметров CI_{RC} , CI_{GB} , σ_{RC}^2 , σ_{GB}^2 и N_{RC} находились методом максимального правдоподобия [1]. После определения параметров оценивалась вероятность принадлежности каждой звезды “красному сгущению” по формуле

$$P = F_{RC}(CI) / [F_{RC}(CI) + F_{GB}(CI)].$$

Если для звезды $P > 0.5$, она относилась к кандидатам КС. В табл. 1 представлены оценки параметров CI_{RC} , σ_{RC}^2 и N_{RC} распределения кандидатов КС по $J - K$, найденные для звезд $9.0 - 9.5^m$ и $10.5 - 11.0^m$ в

каждой из 10 областей неба. Как и следовало ожидать, наблюдается заметная зависимость средних значений показателей цвета CI_{RC} кандидатов КС от галактической широты, и в меньшей степени — от галактической долготы. Эта зависимость в первую очередь обусловлена межзвездным поглощением света, которое особенно сильно вблизи галактической плоскости. Нормальный цвет гигантов КС хорошо известен, поэтому величину полного поглощения света можно найти по избытку их цвета [8].

На рис. 2 сплошными линиями изображены гистограммы распределения звезд по $J-K$ с шагом 0.04^m для двух типичных областей, расположенных на низких и средних широтах соответственно. Пунктирной линией показаны гауссовы кривые, которые наилучшим образом представляют распределения гигантов КС и звезд ВГ. Кривые 1 и 2 получены для звезд $10.5-11.0^m$ и $9.0-9.5^m$ соответственно. Выбранные области резко отличаются по влиянию поглощения света на фотометрические характеристики звезд. Видно, что в условиях сильного поглощения (рис. 2, а) пики распределения кандидатов КС заметно смещены в сторону больших показателей цвета. Можно отметить также, что общие распределения звезд по $J-K$ в интервалах $0.7 < J-K < 1.5^m$ (рис. 2, а) и $0.5 < J-K < 0.9^m$ (рис. 2, б) хорошо представляются двумя гауссовыми кривыми, положения максимумов которых различаются на $0.3-0.2^m$. Такое различие близко к средней разности нормальных показателей цвета гигантов КС и звезд ВГ, чем подтверждается правильность проведенного разделения этих звезд. Как видно из сравне-

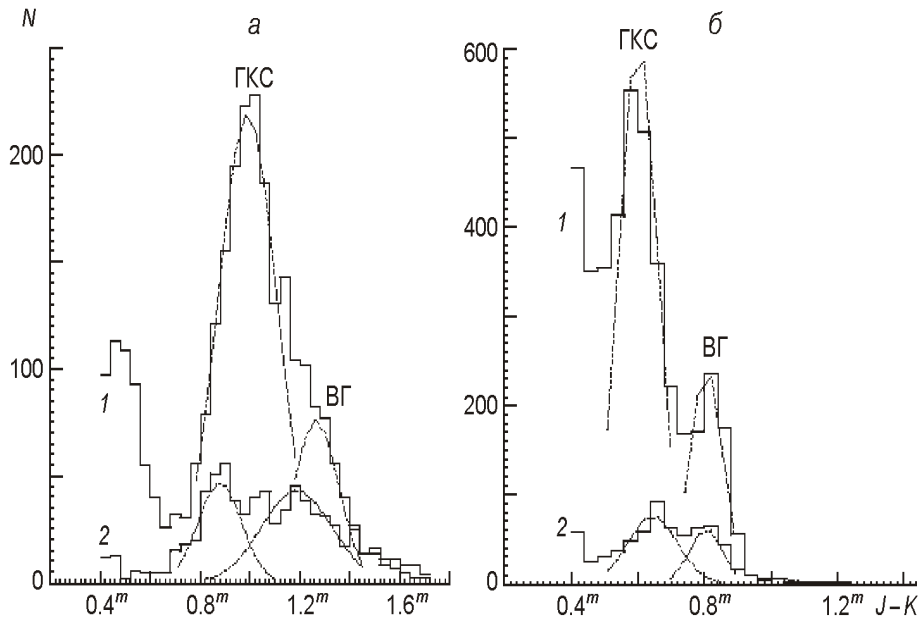


Рис. 2. Гистограммы распределений звезд по показателям цвета $J-K$: а — в области неба $l_c = 155^\circ, b_c = 1^\circ$, б — в области неба $l_c = 65^\circ, b_c = 45^\circ$ (сплошные линии). Пунктирные линии — аппроксимации распределений для кандидатов КС (ГКС) и звезд-кандидатов ветви гигантов гауссовыми кривыми. Кривые 1 — для звезд с блеском m_K от 10.5 до 11.0^m , 2 — от 9.0 до 9.5^m

ния рис. 2, *a* и *b*, с ростом широты и звездной величины звезд в распределении кандидатов КС становится все заметней избыток звезд, обусловленный примесью других типов звезд, в основном карликов. Проблемы выбора оптимальных границ по m_K с целью уменьшения доли последних будут рассмотрены в дальнейшем при создании новой версии каталога гигантов КС. Данные о собственных движениях звезд, которые необходимо включить в этот каталог, могут служить дополнительным критерием для исключения карликов. Так, расстояния до карликов низкой светимости, которые неправильно классифицированы как гиганты КС, будут сильно переоценены, и их можно исключить по слишком большому тангенциальным скоростям.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ И ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА

Расстояния до выделенных кандидатов КС были найдены по формулам

$$E(J - K) = (J - K) - (J - K)_0, \quad (1)$$

$$A_K = E(J - K) / 1.52, \quad (2)$$

$$\lg r = 0.2(m_K - M_K - A_K) + 1, \quad (3)$$

где $E(J - K)$ — избыток цвета, A_K — полное поглощение света, r — оценка расстояния, m_K и $J - K$ — наблюдаемая звездная величина и показатель цвета, M_K и $(J - K)_0$ — средние значения абсолютных звездных величин и нормальных показателей цвета гигантов КС. При этом использована оценка $M_K = -1.62 \pm 0.03^m$, полученная Алвесом [4] по высокоточным параллаксам из каталога HIPPARCOS, а оценка $(J - K)_0$ была принята равной 0.70^m . Последняя оценка вычислена как среднее значение нормальных цветов гигантов КС в рассеянных звездных скоплениях с возрастом более 2 млрд лет и металличностью Солнца по данным [7]. Следует отметить, что величины M_K и $(J - K)_0$ мало зависят от металличности и возраста звезд КС [7], показывая дисперсию меньше 0.3 и 0.1^m соответственно.

Как и в работе [8], избыток цвета $E(J - K)$ вычислялся по формуле (1) для каждого интервала m_K , а поглощение A_K — при помощи формулы (2), выведенной Рике и Лебовски [9]. Затем по формуле (3) находились оценки расстояний до каждой из отобранных звезд. В табл. 2 представлены полученные значения полного поглощения A_K до расстояний 1.5 и 3.0 кпк в направлении восьми областей неба, находящихся вблизи галактической плоскости. Здесь для сравнения также даны вычисленные по модели Арену и др. [5] значения поглощения A_K с применением известного соотношения $A_K = 0.11 A_V$. Найденные нами величины поглощения и его изменения с галактической широтой и долготой хорошо согласуются с оценками поглощения, вычисленного по модели [5]. Это свидетельствует о достоверности полученных

Таблица 2. Оценки поглощения света A_K в направлении областей, расположенных вблизи галактической плоскости

l_c	b_c	S, \square	K	N_{RC}	$r_{RC}, \text{кпк}$	A_K	$A_K [5]$
43	+1	10	9.0— 9.5 ^m	320	1.3	0.24 ^m	0.20 ^m
43	+1	10	10.5—11.0	2010	2.5	0.38	0.21
43	-1	10	9.0— 9.5	382	1.3	0.24	0.20
43	-1	10	10.5—11.0	1988	2.5	0.34	0.21
155	+1	20	9.0— 9.5	255	1.4	0.12	0.26
155	+1	20	10.5—11.0	1625	2.8	0.19	0.26
155	-1	19	9.0— 9.5	245	1.4	0.15	0.19
155	-1	19	10.5—11.0	1532	2.7	0.24	0.24
155	+3	27	9.0— 9.5	375	1.4	0.14	0.19
155	+3	27	10.5—11.0	2156	2.8	0.14	0.24
155	-3	26	9.0— 9.5	443	1.4	0.12	0.19
155	-3	26	10.5—11.0	1954	2.8	0.16	0.24
44	+14	35	9.0— 9.5	545	1.5	0.03	0.06
44	+14	35	10.5—11.0	2211	3.0	0.03	0.06
44	-14	30	9.0— 9.5	553	1.5	0.02	0.13
44	-14	30	10.5—11.0	2220	3.0	0.02	0.13

Примечание: r_{RC} — среднее расстояние до выделенных кандидатов КС с учетом поглощения света A_K ; A_K — оценка поглощения по модели Арену и др. [5]

нами оценок поглощения. В табл. 2 кроме значений поглощения A_K представлены также средние значения расстояний r_{RC} до выделенных кандидатов КС с учетом найденного нами поглощения. Отметим, что относительная погрешность определения индивидуальных расстояний составляет около 11 %, если исходить из точности калибровки Алвеса, равной 0.22^m, и пренебречь совсем незначительными ошибками определения m_K и A_K . Возможная неопределенность принятого значения нормального показателя цвета $(J - K)_0 \sim 0.1^m$ будет давать ошибку в поглощении 0.07^m, вследствие чего дополнительная ошибка расстояний будет составлять около 3 %.

ВЫВОДЫ

В результате анализа фотометрических данных 2MASS в 10 областях неба на разных галактических широтах выделено более 40000 кандидатов “красного сгущения” до $K = 11^m$, что составляет 70 % всех исследуемых звезд (см. <http://mao.kiev.ua/ast/rcgread.html>). По избытку цвета отобранных звезд получены оценки межзвездного поглощения света вплоть до 3 кпк от Солнца в направлении исследуемых областей. Определены также фотометрические расстояния до выделенных звезд с учетом найденного поглощения. Разработанная на примере 10 областей неба методика отбора гигантов «красного сгущения» из каталога 2MASS будет применена при составлении новой версии каталога звезд этого типа.

1. Рыбка С. П. Выделение гигантов красной горизонтальной ветви по приведенным собственным движениям // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—**22**, № 3.—С. 225—230.
2. Рыбка С. П. Каталог звезд-кандидатов Красного Сгущения в “Tycho-2” // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—**23**, № 2.—С. 102—106.
3. Рыбка С. П. Особенности галактического вращения в окрестности Солнца по данным о гигантах “красного сгущения” // Кинематика и физика небес. тел.—2008.—**24**, № 3.—С. 137—145.
4. Alves D. R. K-band calibration of the red clump luminosity // *Astrophys. J.*—2000.—**539**, N 2.—P. 732—741.
5. Arenou F., Grenon M., Gomez A. A tridimensional model of the galactic interstellar extinction // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**258**, N 1.—P. 104—111.
6. Cabrera-Lavers A., Bilir S., Ak S., et al. Estimation of Galactic model parameters in high latitudes with 2MASS // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**464**, N 2.—P. 565—572.
7. Grocholski A. J., Sarajedini A. WIYN open cluster study. X. The K-band magnitude of Red Clump as a distance indicator // *Astron. J.*—2002.—**123**, N 2.—P. 1603—1612.
8. Lopez-Corredoira M., Cabrera-Lavers A., Garzon F., et al. Old stellar Galactic discs in near-plane regions according to 2MASS: Scales, cut-off, flare and warp // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**394**, N 3.—P. 883—900.
9. Rieke G. H., Lebofsky M. J. The interstellar extinction law from 1 to 13 microns // *Astrophys. J.*—1985.—**288**, N 1.—P. 618—621.
10. Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.*—2006.—**131**, N 2.—P. 1163—1183.

Поступила в редакцию 29.09.08