

УДК 524.6-32

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 94 РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ ОБЗОРОВ IPHAS, GAIA DR2 И ДРУГИХ

© 2018 Л. Н. Ялялиева^{1,2*}, А. А. Чемель²,
Е. В. Глушкова^{1,2**}, А. К. Дамбис^{1***}, А. Д. Клиничев²

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

²Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

Поступила в редакцию 14 мая 2018 года; принята в печать 15 июня 2018 года

Для 94 рассеянных скоплений северной части Млечного Пути определены избытки цвета, фотометрические расстояния, возрасты, астрометрические параллаксы и абсолютные собственные движения. Избытки цвета и фотометрические расстояния оценивались на основе данных фотометрического обзора IPHAS с использованием индивидуальных значений отношения полного поглощения в полосе r к избытку цвета E_{r-i} ($R_r = A_r/E_{r-i}$), которые вычислялись для каждого скопления методом цветовых разностей по данным фотометрии в ряде фотометрических обзоров неба (IPHAS, 2MASS, WISE и Pan-STARRS). Величины R_r существенно меняются от скопления к скоплению: минимальное и максимальное значения равны $R_r = 3.1$ и $R_r = 5.2$ соответственно при средней величине $\langle R_r \rangle = 3.99$ и дисперсии $\sigma R_r = 0.34$. Члены скоплений выделялись (1) по абсолютным собственным движениям, определенным по положениям звезд в семи каталогах (IPHAS, 2MASS, URAT1, ALLWISE, UCAC5, Gaia DR1 и USNO-B1.0 — всего до тринадцати положений на звезду), редуцированных в единую систему, заданную положениями и собственными движениями опорного каталога (UCAC5) и (2) по абсолютным собственным движениям из каталога Gaia DR2, на основе данных которого для надежных членов скоплений определены средние астрометрические параллаксы и абсолютные собственные движения скоплений. Среднее значение формальной ошибки тригонометрических параллаксов скоплений составляет около 7 микросекунд дуги, но, согласно данным сравнения астрометрических и фотометрических параллаксов скоплений, тригонометрические параллаксы Gaia DR2 в среднем занижены на 45 ± 9 угловых микросекунд, что согласуется с оценками, полученными другими авторами по другим объектам. При этом сравнение фотометрических и астрометрических параллаксов скоплений свидетельствует о правильности шкалы фотометрических расстояний на уровне 2.5%.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — Галактика: кинематика и динамика*

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия заметно увеличилось число обзоров неба, в которых приводятся различные данные о характеристиках огромного числа объектов. Однако при использовании фотометрических каталогов большинство исследователей извлекает из них только данные о величинах звезд в различных полосах пропускания. Между тем во всех таких каталогах, помимо звездных величин, содержатся экваториальные координаты объектов, которые можно использовать для вычисления как относительных, так и абсолютных собственных движений звезд на большом временном интервале,

что особенно важно для двойных систем. Успешным примером использования шести больших обзоров для определения абсолютных собственных движений 115 шаровых скоплений Галактики является работа Чемеля и др. [1].

В настоящей работе предпринята попытка определения собственных движений звезд с использованием позиционных данных из семи фотометрических каталогов неба в окрестностях рассеянных звездных скоплений Галактики, наблюдавшихся в обзоре IPHAS [2, 3], с тем, чтобы применить к членам скоплений разработанный ранее в статье Дамбиса и др. [4] алгоритм нахождения основных параметров рассеянных звездных скоплений (РЗС) с помощью модифицированного Q -метода. Несмотря на то, что молодые рассеянные скопления представляют собой наиболее подходящие

* E-mail: yalyalieva@yandex.ru

** E-mail: elena.glushkova@gmail.com

*** E-mail: dambis@yandex.ru

объекты для исследования диска нашей Галактики, их основные физические параметры (расстояние, возраст, избыток цвета) все еще нуждаются в уточнении. Один из двух наиболее используемых источников информации о параметрах РЗС — каталог Диаса и др. [5] — является компилятивным и содержит данные различной степени точности и достоверности примерно для 2000 объектов. Параметры более 3000 РЗС, содержащиеся в другом источнике — каталоге Харченко и др. [6], — хотя и определены единообразно по данным обзора 2MASS [7], но являются надежными только для близких и старых скоплений, у которых на диаграммах Герцшпрунга—Рассела (ГР-диаграммах) хорошо заметно сгущение звезд у основания ветви красных гигантов. Для всех остальных РЗС оценка параметров по данным сравнительно неглубокой J -, H -, K_S -фотометрии ненадежна, особенно значения расстояний, полученные с помощью наложения изохрон на ГР-диаграмму, так как для используемых полос пропускания главная последовательность вертикальна для молодых скоплений, расположенных дальше 1 кпк от Солнца.

Особый интерес в настоящей работе представляет исследование закона поглощения в направлении на каждое из скоплений, а также сравнение средних параллаксов скоплений, выведенных по данным обзора GAIA DR2 [8, 9], с фотометрическими параллаксами, полученными с помощью каталога IPHAS [2, 3].

2. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИЗ КАТАЛОГОВ ИНФОРМАЦИИ О СКОПЛЕНИЯХ

2.1. Избыток цвета, расстояние, возраст

Для оценки физических параметров скоплений (избытков цвета, гелиоцентрических расстояний и возрастов) были выбраны величины звезд, измеренные в фильтрах r и i Слоановской системы и узкополосном фильтре $H\alpha$, из каталога IPHAS [2, 3]. Этот обзор выполнен на 2.5-м телескопе им. Исаака Ньютона (INT) для звезд северного неба в интервале галактических координат: $l = 30^\circ - 215^\circ$, $|b| < 5^\circ$, до предельных величин 21.2, 20.0 и 20.3 в фильтрах r , i и $H\alpha$ соответственно. Используя r , i , $H\alpha$ -величины, Дамбис и др. [4] модифицировали классический Q -метод Джонсона и Моргана [10] и построили не зависящий от поглощения фотометрический индекс

$$H\alpha\text{-index} = 0.755 r + 0.245 i - H\alpha.$$

Как и в статье [4], в настоящей работе диаграмма ($H\alpha\text{-index}$, $r - i$) использовалась для определения избытка цвета $E(r - i)$. На такой диаграмме линии нарастающего поглощения параллельны горизонтальной оси, так как комбинация $0.755 r + 0.245 i$

представляет собой линейную интерполяцию между соответствующими фотометрическими полосами и является имитацией широкополосного фильтра $H\alpha$, и поэтому величина $H\alpha\text{-index}$ не зависит от поглощения. Изохроны PARSEC Падуанской системы [11–13] на диаграмме ($r - i$, $H\alpha\text{-index}$) имеют минимум при одном и том же значении ($r - i$) с возрастом в интервале $\lg t = 6.0 - 8.5$, причем этот минимум практически не зависит от металличности. Это связано с тем, что линия поглощения $H\alpha$ достигает максимальной интенсивности у звезд спектрального класса A0–A2. Поэтому данный метод применим только к относительно молодым скоплениям ($\lg t < 8.5$), у которых на ГП еще имеются звезды указанных классов. Таким образом, величина $E(r - i)$ находилась сдвигом изохроны (на первом этапе возраст задавался как $\lg t = 7.2$) вдоль горизонтальной оси. Модуль расстояния определялся затем по диаграммам ($r - i$, r), ($H\alpha\text{-index}$, r) и ($H\alpha\text{-index}$, $r - 3.98(r - i)$), а возраст оценивался только по диаграммам ($r - i$, r) и ($H\alpha\text{-index}$, $r - 3.98(r - i)$), причем для звезд ярче $r = 13$, $i = 12$ величины брались из обзора APASS [14, 15] и трансформировались в фотометрическую систему IPHAS по формулам из работы [2], так как в каталоге IPHAS такие звезды перекоплены. Вся многоступенчатая процедура оценки параметров описана в работе Дамбиса и др. [4].

На рис. 1 слева вверху показана двухцветная диаграмма, на которой изохрона с возрастом $\lg t = 7.59$ (тонкая линия) сдвинута по оси абсцисс на величину 0.647 до совмещения с главной последовательностью звезд скопления SAI 14. Жирной линией показана изохрона, сдвинутая затем вдоль вертикальной оси, чтобы учесть небольшое систематическое различие в нуль-пункте между теоретическими изохронами и наблюдаемыми последовательностями. На остальных панелях рис. 1 показаны изохроны, сдвинутые на величину модуля расстояния, причем на нижних панелях такой сдвиг показан прерывистой линией. Окончательный сдвиг на нижних панелях учитывает отмеченное выше различие в нуль-пунктах.

Все оценки параметров производились в автоматическом режиме способом, предложенном в работах [16–18] и основанном на методе максимального правдоподобия. Значения модуля расстояния, полученные по трем разным диаграммам, усреднялись.

Модули расстояния, избытки цвета и возрасты были найдены для 108 рассеянных скоплений из каталога Диаса и др. [5], для которых имелись данные в обзоре IPHAS [2, 3] и на диаграммах ($H\alpha\text{-index}$, $r - i$) которых обнаруживался минимум.

Однако для более точной оценки параметров необходимо было предварительно отделить члены скопления от звезд фона. Для этой цели в полях 108 скоплений были определены собственные движения звезд.

2.2. Собственные движения и членство звезд в скоплениях

Для выведения собственных движений звезд использовались большие фотографические каталоги POSS-I, POSS-II, SERC-J, SERC-EJ, ESO-R, AAO-R, SERC-ER, SERC-I, охватывающие период наблюдений с 1949 г. по 2002 г., и включенные в каталог USNO-B1.0 [19], а также обширные обзоры UCAC5 [20] (1998–2004 гг.), 2MASS [7] (1997–2001 гг.), WISE [21, 22] (2010–2011 гг., средняя эпоха 2010.5589), URAT1 [23] (2012–2015 гг.), IPHAS [2, 3] (2003–2012 гг.) и Gaia DR1 [8] (средняя эпоха 2015.0), в которых содержатся достаточно точные позиционные данные. Сначала надо было взаимно отождествить звезды по всей выборке каталогов.

В нашем распоряжении уже имелись средства для работы с большими массивами астрономических данных, такие как интерактивный атлас неба Aladin [24], пакеты STILTS [25], TOPCAT [26], C3 [27]. Они позволяют проводить парное или даже множественное взаимное отождествление каталогов, но при регулярной работе не очень удобны в использовании, так как пользователю приходится каждый раз выполнять практически одну и ту же последовательность операций (задавать набор используемых каталогов, условия отождествления, форматы выходных файлов и т.п.). Для упрощения этой процедуры была разработана программа Crossmatch, которая осуществляет взаимное отождествление звезд по произвольному числу каталогов в поле произвольного размера вокруг центра с заданными координатами и которую отличает простота и гибкость в использовании. Программа Crossmatch написана на языке Java, распространяется в виде jar-дистрибутива и запускается из командной строки. Значительная часть операций над таблицами, описанная в алгоритме Crossmatch, осуществляется с использованием возможностей STILTS [25]. Исходные тексты программы доступны в виде одного архивного файла Crossmatch_4.3.0.zip на сайте www.sai.msu.ru/groups/cluster/cl/crossmatch/.

С помощью этой программы для каждого рассеянного скопления было проведено взаимное отождествление каталогов в пределах $30'$ вокруг центра с использованием радиуса отождествления $1''$ или $2''$. В результате было получено до тринадцати положений на звезду. Процедура определения собственных движений подробно описана в статье

Чемеля и др. [1], посвященной изучению кинематики шаровых звездных скоплений Галактики. Все собственные движения были редуцированы в систему каталога UCAC5. Точность определения индивидуальных собственных движений составила 1–2 миллисекунды дуги в год.

Затем по собственным движениям были выделены члены каждого из скоплений широко используемым методом Сандерса [28]. Этот метод позволяет определить средние собственные движения звезд скопления $(\mu_\alpha^*, \mu_\delta^*)$ и звезд фона (μ_α, μ_δ) , дисперсии собственных движений звезд скопления $(\sigma_\alpha^*, \sigma_\delta^*)$ и звезд фона $(\sigma_\alpha, \sigma_\delta)$, а также относительное число членов скопления (N) . Он был реализован в предположении изотропного распределения по скоростям звезд скопления $(\sigma_\alpha^* = \sigma_\delta^* = \sigma^*)$. Предварительно осуществлялось преобразование поворота таким образом, чтобы оси эллипса распределения собственных движений звезд фона совпали с координатными осями.

Функции плотности вероятности звезд скопления F^* и звезд фона F^f имели следующий вид:

$$F_i^* = \frac{N}{2\pi\sqrt{\sigma^{*2} + \varepsilon_\alpha^{i2}}\sqrt{\sigma^{*2} + \varepsilon_\delta^{i2}}} \times \exp\left(-0.5\left[\frac{(\mu_\alpha^i - \mu_\alpha^*)^2}{\sigma^{*2} + \varepsilon_\alpha^{i2}} + \frac{(\mu_\delta^i - \mu_\delta^*)^2}{\sigma^{*2} + \varepsilon_\delta^{i2}}\right]\right), \quad (1)$$

$$F_i^f = \frac{1 - N}{2\pi\sqrt{\sigma_\alpha^2 + \varepsilon_\alpha^{i2}}\sqrt{\sigma_\delta^2 + \varepsilon_\delta^{i2}}} \times \exp\left(-0.5\left[\frac{(\mu_\alpha^i - \mu_\alpha)^2}{\sigma_\alpha^2 + \varepsilon_\alpha^{i2}} + \frac{(\mu_\delta^i - \mu_\delta)^2}{\sigma_\delta^2 + \varepsilon_\delta^{i2}}\right]\right), \quad (2)$$

где μ_α^i и μ_δ^i , ε_α^i и ε_δ^i — собственные движения и их погрешности для i -й звезды выборки. Тогда полная функция плотности вероятности имеет вид: $F_i = F_i^* + F_i^f$.

Так как собственные движения отдельных звезд независимы, функция правдоподобия вычисляется как произведение функций плотности вероятности по всем звездам выборки: $Q = \prod_i F_i$. Согласно принципу максимального правдоподобия, истинными значениями считаются те, для которых реализуется наиболее вероятное распределение, т.е. в максимуме функции правдоподобия. Однако на практике удобнее искать минимум функции следующего вида:

$$L = -\lg Q = -\sum_i \lg F_i.$$

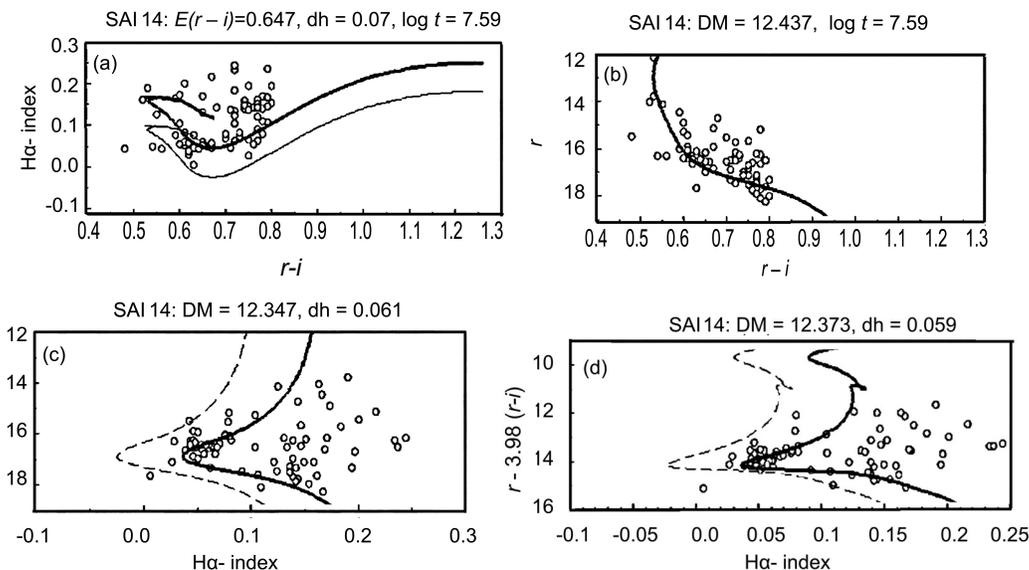


Рис. 1. Двухцветная диаграмма ($r - i$, $H\alpha$ -index) (a) и диаграммы цвет-величина ($r - i$, r) (b), ($H\alpha$ -index, r) (c) и ($H\alpha$ -index, $r - 3.98(r - i)$) (d) для всех звезд в поле скопления SAI 14 в пределах $5'$ от центра. Сплошной толстой линией показана изохрона с возрастом $\lg t = 7.59$, сдвинутая в соответствии с найденными значениями избытка цвета и модуля расстояния. Тонкой сплошной и прерывистой линиями показана изохрона до окончательного сдвига, учитывающего разницу в нуль-пункте между теоретической изохроной и наблюдаемой ГП скопления.

Минимизация проводилась методом сопряженных градиентов. Вероятность принадлежности звезды к скоплению оценивалась по формуле:

$$P_i = \frac{F_i^*}{F_i}$$

После этого описанным выше методом с использованием вероятных членов скоплений были определены избытки цвета, модули расстояния и возрасты 108 скоплений. На рис. 2 показаны те же диаграммы, что и на рис. 1, но построенные только по звездам-членам скопления SAI 14.

2.3. Закон поглощения

При вычислении расстояний до скоплений необходимо учитывать поглощение в направлении на скопление. Чаще всего используется так называемый «стандартный» закон поглощения Карделли и др. [29] или его модификация, предложенная О'Доннеллом [30], согласно которой поглощение является заданной функцией длины волны и параметра R_V , равного отношению поглощения в полосе V к избытку цвета E_{B-V} ($R_V = A_V/E_{B-V}$), которое считается постоянным в диске Галактики и равным $R_V = 3.1$. В реальности закон межзвездного поглощения (в данном случае определяемый значением параметра R_V) сильно меняется как в зависимости от направления в Галактике, так и от расстояния [31]. В настоящей работе для характеристики закона поглощения

Таблица 1. Используемые фильтры

Обзор	IPHAS		Pan-STARRS			2MASS			WISE
Фильтр	i	i	z	y	J	H	K_s	$W1$	
$\lambda_{\text{eff}}, \mu\text{m}$	0.77	0.75	0.87	0.96	1.25	1.65	2.17	3.35	

брался параметр R_r , равный отношению поглощения в полосе r системы IPHAS к избытку цвета E_{r-i} ($R_r = A_r/E_{r-i}$), — именно этот параметр определялся в направлении каждого скопления, а затем он использовался при нахождении расстояний до РЗС. Для исследования закона поглощения были выбраны данные фотометрии в фильтрах ближнего инфракрасного диапазона: J , H , K_s (2MASS), $W1$ (WISE), i , z , y (Pan-STARRS), по которым определялись видимые показатели цвета звезд. Фильтр $W2$ (средняя длина волны $\lambda = 4.6$ мкм) не включался в рассмотрение, так как в окрестности $\lambda = 4.5$ мкм существует пик поглощения [32], и, таким образом, заведомо нарушается предполагаемое монотонное степенное уменьшение поглощения с длиной волны. В таблице 1 указаны средние длины волн использованных полос пропускания.

Истинные показатели цвета находились с помощью теоретических изохран [11–13], причем при построении НГП использовалась начальная функция масс Круппы [33]. Распределение полученных избытков цвета $E(r - \lambda_i) = (r - \lambda_i)_{\text{vis}} - (r - \lambda_i)_0$

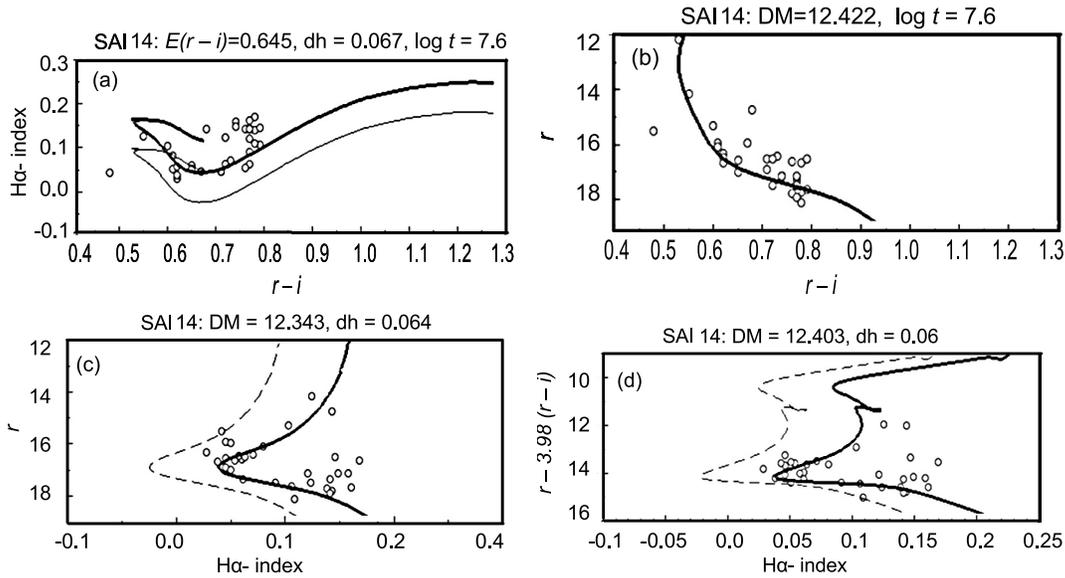


Рис. 2. Двухцветная диаграмма и диаграммы «цвет–величина» для звезд–членов скопления по собственным движениям в пределах $5'$ от центра скопления SAI 14. Линии те же, что на рис. 1.

для звезд одного скопления аппроксимировалось функцией Гаусса: таким образом находились средние значения $E(r - \lambda_i)$.

Затем для каждого РЗС строился график зависимости среднего избытка цвета $E(r - \lambda_i)$ от эффективной длины волны $\lambda_{\text{eff}}(i)$, который для волн ближнего инфракрасного диапазона описывается функцией вида [34]:

$$E(r - \lambda) = a + b \lambda^{-\alpha} \quad (3)$$

При $\lambda \rightarrow \infty$ избыток цвета $E(r - \lambda)$ стремится к A_r — полному поглощению в фильтре r , т.е. из решения уравнения (3) находится $A_r = a$. Зная определенный ранее избыток цвета $E(r - i)$ (см. раздел 2.1), находим закон поглощения $R_r = \frac{A_r}{E(r - i)}$.

Для нахождения закона поглощения в каждом РЗС были отобраны звезды, лежащие в области минимума на диаграмме $(r-i, \text{Ha-index})$. У 14 скоплений из 108 не было данных о звездной величине $W1$ почти для всех из отобранных звезд, поэтому в дальнейшем все вычисления проводились для 94 РЗС. Принадлежность к скоплению отобранных звезд была уточнена с помощью собственных движений из обзора Gaia DR2, который появился в открытом доступе на данном этапе наших исследований. Распределение звезд на плоскости (μ_α, μ_δ)

аппроксимировалось двумерной гауссианой:

$$f = \frac{1}{2\pi\sigma_\alpha\sigma_\delta\sqrt{1-k^2}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-k^2)}\left[\frac{(\mu_\alpha^i - \mu_\alpha)^2}{\sigma_\alpha^2} - k\frac{2(\mu_\alpha^i - \mu_\alpha)(\mu_\delta^i - \mu_\delta)}{\sigma_\alpha\sigma_\delta} + \frac{(\mu_\delta^i - \mu_\delta)^2}{\sigma_\delta^2}\right]\right), \quad (4)$$

где $\mu_\alpha, \sigma_\alpha, \mu_\delta, \sigma_\delta$ — средние значения распределения и их стандартные отклонения, k — коэффициент корреляции. Линии равной вероятности представляют собой эллипсы, описываемые уравнением:

$$\frac{(\mu_\alpha^i - \mu_\alpha)^2}{\sigma_\alpha^2} - k\frac{2(\mu_\alpha^i - \mu_\alpha)(\mu_\delta^i - \mu_\delta)}{\sigma_\alpha\sigma_\delta} + \frac{(\mu_\delta^i - \mu_\delta)^2}{\sigma_\delta^2} = const \quad (5)$$

Эллипс с $const = 9$ соответствует разбросу значений собственных движений отдельных звезд в пределах 3σ от средних, которые и были использованы для нахождения закона поглощения. Аппроксимация проводилась с помощью нелинейного МНК. После первого приближения отбрасывались звезды, находящиеся за пределами 3σ , и аппроксимация повторялась. Полученные значения $\mu_\alpha, \sigma_\alpha, \mu_\delta, \sigma_\delta$ использовались для оценки среднего собственного движения скопления и его ошибок.

По данным для членов скопления был найдены

Таблица 2. Параметры рассеянных скоплений

РЗС	D , pc	σ_D , pc	π , mas	σ_π , mas	π_{galia} , mas	$\sigma_{\pi_{\text{galia}}}$, mas	$\lg t$, [Myr]	R_r	σ_{R_r}	A_r	σ_{A_r}	α	σ_α	μ_α , mas yr ⁻¹	σ_{μ_α} , mas yr ⁻¹	μ_δ , mas yr ⁻¹	σ_{μ_δ} , mas yr ⁻¹
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
sai 11	3220	158	0.311	0.015	0.223	0.008	8.2	4.114	0.081	3.314	0.074	1.738	0.066	-1.609	0.018	-0.192	0.010
SAI 13	3035	220	0.329	0.024	0.283	0.005	8.2	3.752	0.048	3.487	0.057	1.934	0.039	-1.610	0.009	-0.056	0.009
SAI 14	2873	89	0.348	0.011	0.307	0.010	7.6	4.131	0.083	2.666	0.060	1.838	0.085	-1.555	0.072	-0.269	0.053
sai 145	2368	64	0.422	0.011	0.362	0.006	8.4	4.237	0.085	2.877	0.064	1.773	0.067	-3.086	0.018	-2.825	0.015
sai 149	2933	244	0.341	0.028	0.309	0.010	7.8	3.972	0.162	3.406	0.175	1.755	0.133	-3.797	0.018	-1.666	0.012
sai 150	3043	139	0.329	0.015	0.259	0.007	8.2	4.167	0.180	2.246	0.106	1.597	0.138	-2.022	0.011	-1.217	0.009
sai 16	4161	301	0.240	0.017	0.348	0.021	8.2	3.966	0.180	2.845	0.141	1.570	0.129	-1.472	0.098	0.141	0.122
sai 25	2772	107	0.361	0.014	0.289	0.018	7.8	3.872	0.071	4.016	0.078	1.815	0.085	0.254	0.090	-0.812	0.077
sai 29	3092	126	0.323	0.013	0.276	0.008	8.2	3.856	0.111	2.839	0.098	1.772	0.085	1.103	0.013	-0.399	0.010
sai 31	3516	361	0.284	0.029	0.223	0.011	8.2	4.180	0.224	2.377	0.159	1.655	0.130	0.087	0.052	-0.103	0.090
sai 40	4608	201	0.217	0.009	0.208	0.009	8.2	3.905	0.109	1.629	0.054	1.729	0.075	0.385	0.019	-1.103	0.012
sai 44	3917	67	0.255	0.004	0.260	0.010	8.7	3.762	0.100	1.360	0.040	1.534	0.099	-0.242	0.010	-1.650	0.013
sai 58	2973	230	0.336	0.026	0.356	0.024	8.2	3.683	0.077	3.584	0.093	1.758	0.060	0.090	0.030	-1.599	0.027
sai 61	2084	100	0.480	0.023	0.454	0.006	8.4	3.826	0.162	1.772	0.097	1.774	0.096	-0.482	0.018	-1.082	0.018
sai 64	4412	279	0.227	0.014	0.214	0.008	8.5	3.728	0.147	1.493	0.076	1.957	0.105	-0.173	0.010	0.041	0.011
sai 72	4135	140	0.242	0.008	0.295	0.021	8.2	4.116	0.126	1.981	0.075	1.875	0.093	-0.320	0.023	0.055	0.016
sai 8	3556	154	0.281	0.012	0.186	0.011	8.2	4.102	0.163	2.151	0.096	1.504	0.106	-0.967	0.025	-0.431	0.021
stock 17	2485	101	0.402	0.016	0.321	0.007	8.2	4.452	0.157	2.217	0.097	1.741	0.093	-3.696	0.013	-1.410	0.041
stock 24	2727	133	0.367	0.018	0.326	0.004	8.2	3.785	0.146	1.551	0.071	1.979	0.142	-1.407	0.016	0.077	0.010
teutsch 2	4806	444	0.208	0.019	0.208	0.012	8.2	4.340	0.250	2.039	0.160	1.677	0.067	0.491	0.018	-1.374	0.012
teutsch 23	2551	139	0.392	0.021	0.296	0.008	8.2	3.889	0.101	2.664	0.076	1.777	0.084	-2.913	0.046	-1.323	0.028
tombaugh 5	1800	56	0.556	0.017	0.562	0.003	8.2	3.606	0.075	2.252	0.057	1.814	0.068	0.534	0.011	-2.386	0.007
trumpler 1	2431	263	0.411	0.045	0.358	0.004	7.9	4.113	0.651	1.439	0.322	1.977	0.071	-1.600	0.010	-0.520	0.009

параметры R_r и α закона поглощения, и полученное значение R_r использовалось для вычисления фотометрического расстояния до РЗС в пк, а также его фотометрического параллакса. Кроме того, средневзвешенный тригонометрический параллакс скоплений был вычислен путем усреднения индивидуальных параллаксов звезд по данным из обзора Gaia DR2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные параметры скоплений представлены в таблице 2 (полная версия доступна в электронном виде по адресу: www.sai.msu.ru/groups/cluster/cl/iphas_oc1). В столбце (1) приводится название скопления; (2) и (3) — расстояние до скопления и его среднеквадратичная ошибка в пк; (4) и (5) — фотометрический параллакс скопления и его среднеквадратичная ошибка, вычисленные по найденному фотометрическому расстоянию; (6) и (7) — астрометрический (тригонометрический) параллакс скопления и его ошибка, вычисленные по данным обзора Gaia DR2; (8) логарифм возраста скопления в миллионах лет, (9) и (10) — параметр R_r закона поглощения и его среднеквадратичная ошибка; (11) и (12) — полное поглощение в фильтре r и его среднеквадратичная ошибка; (13) и (14) — показатель степени α из уравнения (3) и его среднеквадратичная ошибка; (15) и (16) — среднее значение компоненты собственного движения по прямому восхождению и ее среднеквадратичная ошибка в миллисекундах дуги в год; (17) и (18) — соответствующие значения средней компоненты собственного движения по склонению и ее среднеквадратичной ошибки в миллисекундах дуги в год.

На рис. 3 представлено сравнение фотометрических параллаксов изученных скоплений с астрометрическими параллаксами из Gaia DR2. Видно, что астрометрические параллаксы систематически меньше фотометрических. Прерывистой линией на рисунке проведена диагональ, а сплошной — линейная зависимость, найденная с помощью минимизации симплекс-методом функции следующего вида:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\pi_{\text{Gaia},i} - a\pi_i - b)^2}{\sigma_{\text{Gaia},i}^2 + a^2\sigma_i^2}, \quad (6)$$

где константы получились равными $a_{\text{opt}} = 0.983 \pm 0.025$, $b_{\text{opt}} = -44.6 \pm 8.9$ угловых микросекунд. Погрешности были оценены путем построения сечения поверхности $\chi^2(a, b)$ плоскостью $\chi^2 = \chi^2(a_{\text{opt}}, b_{\text{opt}}) + 1$. Отсюда следует, что шкала полученных нами фотометрических расстояний (и фотометрических параллаксов) скоплений согласуется со шкалой расстояний, основанной на

тригонометрических параллаксах Gaia DR2 (коэффициент $a_{\text{opt}} = 0.983 \pm 0.025$ в пределах ошибок не отличается от единицы), а систематическая ошибка шкалы тригонометрических параллаксов Gaia DR2 составляет около -44.6 ± 8.9 угловых микросекунд (измеренные тригонометрические параллаксы в среднем занижены на эту величину).

В руководстве [35] по использованию параллаксов из Gaia DR2 признается наличие сдвига нуля в них на 30 угловых микросекунд. Зинн и др. [36] нашли по звездам ветви красных гигантов из каталога АРОКАС-2 [37] и по звездам так называемого «красного сгущения» сдвиг нуля параллаксов Gaia DR2 равным 52.8 ± 3.4 и 50.2 ± 3.5 угловых микросекунд соответственно. В статье Рисса и др. [38] сдвиг в 46 ± 13 угловых микросекунд был получен по ярким галактическим цефеидам. Так же, как и в нашем исследовании, во всех случаях параллаксы, определенные по Gaia DR2, оказывались систематически занижены.

На рис. 4а показано распределение параметра R_r , который характеризует закон поглощения в фильтре r обзора IPHAS. Среднее значение $\langle R_r \rangle = 3.99 \pm 0.04$ значимо (хотя и немного) отличается от «нормального» закона Карделли и др. [29] с $R_V = 3.1$, согласно которому $R_r = 3.88$, и при этом лучше согласуется с законом поглощения О’Доннелла [30] с $R_r = 4.07$. Стоит обратить внимание на широкую дисперсию распределения на рис. 4а, равную $\sigma_{R_r} = 0.35$. Зависимость R_r от галактической долготы и гелиоцентрического расстояния не обнаружена.

В обзоре Матсунаги и др. [39] отмечено, что в исследованиях, проводившихся до 1995 г., показатель степени α в уравнении (3) был равен 1.6–1.8, тогда как в более поздних работах разброс значений α составляет у разных авторов от 0.8 до 2.6 [40]. Полученные нами величины α охватывают более широкий диапазон от 0.74 до 4.01 (см. рис. 4б) при среднем значении и дисперсии равных $\langle \alpha \rangle = 2.05$ и $\sigma_\alpha = 0.58$ соответственно.

На рис. 5 показано распределение изученных скоплений на галактической плоскости в полярных координатах. Чем темнее цвет кружков, тем больше величина R_r . Хорошо просматривается изменение закона поглощения как с расстоянием, так и с направлением.

На рис. 6 показаны распределения разностей между собственными движениями скоплений по прямому восхождению и склонению, полученными методом Сандерса в разделе 2.2, и собственными движениями РЗС, выведенными по данным из обзора Gaia DR2 в разделе 2.3. Средние значения и дисперсии распределений получились равными:

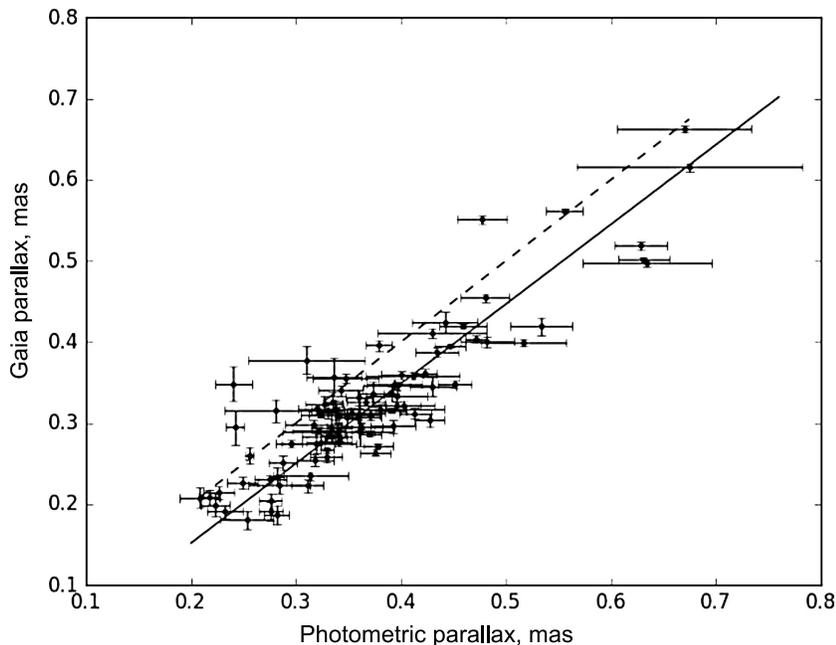


Рис. 3. Сравнение фотометрических параллаксов с астрометрическими параллаксами, полученными по данным Gaia DR2. Прерывистой линией показана диагональ, сплошной — найденная линейная зависимость.

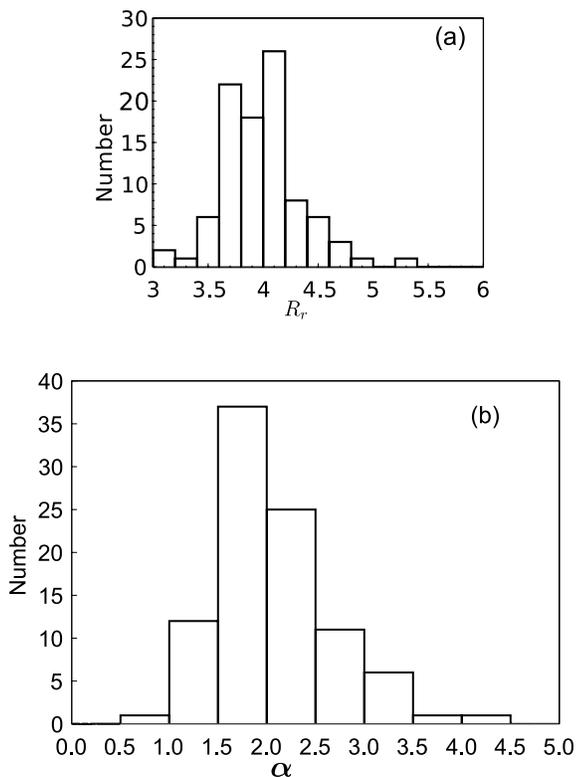


Рис. 4. Распределение параметров закона поглощения R_r (a) и α (b) в полях 94 изученных РЗС.

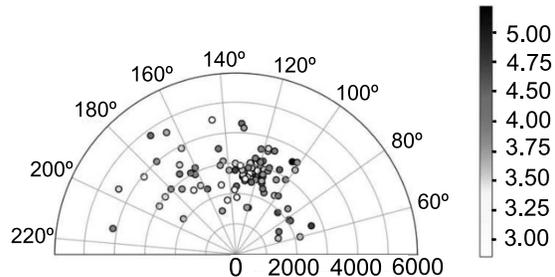


Рис. 5. Распределение скоплений на плоскости Галактики. В центре координат находится Солнце, по радиусу отложено расстояние в пк, по углу — галактическая долгота. Цвет соответствует величине параметра R_r .

$$\langle \Delta \mu_\alpha \rangle = -1.036 \pm 0.088 \text{ mas year}^{-1},$$

$$\sigma \Delta \mu_\alpha = 0.998 \pm 0.088 \text{ mas year}^{-1},$$

$$\langle \Delta \mu_\delta \rangle = 0.347 \pm 0.090 \text{ mas year}^{-1},$$

$$\sigma \Delta \mu_\delta = 0.910 \pm 0.091 \text{ mas year}^{-1}.$$

Средние разности собственных движений оказываются примерно на уровне оценки характерных систематических ошибок использованного нами в качестве астрометрического опорного каталога UCAC5, которые, по мнению его авторов, находятся в пределах 0.7 миллисекунд дуги в год [20]. В таблице 2 приводятся только средние собственные движения скоплений, полученные по Gaia DR2.

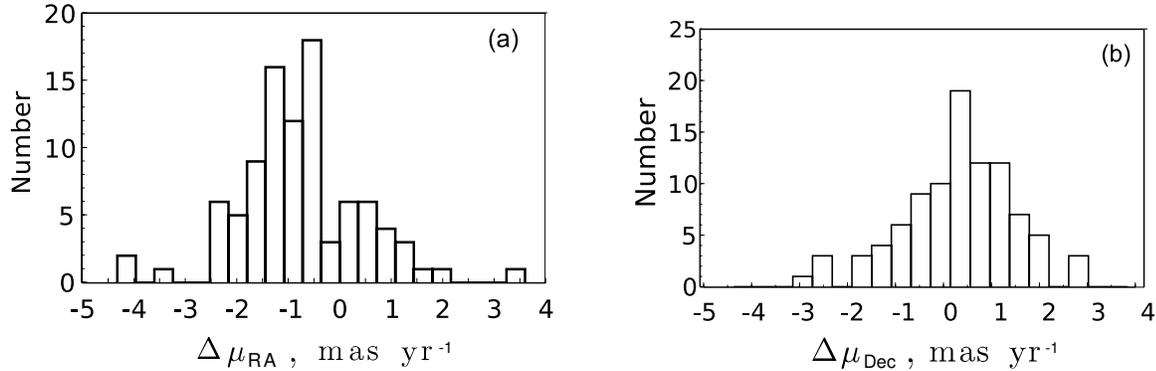


Рис. 6. Сравнение собственных движений, выведенных по позиционным данным семи каталогов (до тринадцати различных эпох в интервале от 1949 г. до 2015 г.) и по данным Gaia DR2: (а) по прямому восхождению и (б) по склонению.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для почти ста молодых скоплений северного Млечного Пути в единой системе определены фотометрические расстояния и избытки цвета E_{r-i} (на основе данных обзора IPHAS), возрасты, а также средние астрометрические параллаксы и абсолютные собственные движения (на основе данных каталога Gaia DR2). Фотометрические расстояния оценивались с учетом использованием индивидуальных значений отношения полного поглощения в полосе r к избытку цвета E_{r-i} для каждого скопления, которые вычислялись методом цветовых разностей по данным фотометрии в полосах r , i , $H\alpha$ обзора IPHAS, J , H , K_s обзора 2MASS, $W1$ обзора WISE и i , z , y обзора Pan-STARRS. Обнаружены существенные вариации значения R_r при среднем значении $\langle R_r \rangle = 3.99$ и дисперсии $\sigma R_r = 0.34$. Установлено хорошее согласие шкалы полученных фотометрических расстояний со шкалой тригонометрических параллаксов Gaia DR2 и получена оценка систематической ошибки параллаксов Gaia DR2, которые в среднем занижены на 45 ± 9 угловых микросекунд. Этот вывод находится в хорошем согласии с результатами, полученными другими авторами по другим объектам (классическим цефеидам, квазарам, звездам ветви красных гигантов и звездам красного сгущения).

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа осуществлялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект номер 18-02-00890). В работе использовались данные обзора Two Micron All Sky Survey (2MASS) — совместного проекта Массачусетского университета и Центра обработки и анализа инфракрасных данных при Калифорнийском технологическом институте, осуществленного

при поддержке НАСА и Национального научного фонда США, данные обзорного телескопа Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) — совместного проекта Калифорнийского университета (Лос-Анджелес) и Лаборатории реактивного движения при поддержке НАСА, данные фотометрического $H\alpha$ -обзора северной части галактической плоскости (IPHAS), полученного с помощью телескопа им. Исаака Ньютона (INT), данные фотометрического обзора обсерватории AAVSO (APASS), данные фотометрического обзора Pan-STARRS 1, а также данные проекта Gaia Европейского космического агентства (ЕКА) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные Консорциумом по обработке и анализу данных Gaia (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>) при поддержке национальных организаций, в частности, организаций—участниц многостороннего соглашения Gaia.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Chemel, E. V. Glushkova, A. K. Dambis, et al., *Astrophysical Bulletin* **73**, 162 (2018).
2. G. Barentsen, H. J. Farnhill, J. E. Drew, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444**, 3230 (2014).
3. J. E. Drew, R. Greimel, M. J. Irwin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **362**, 753 (2005).
4. A. K. Dambis, E. V. Glushkova, L. N. Berdnikov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 1505 (2017).
5. W. S. Dias, B. S. Alessi, A. Moitinho, and J. R. D. Lépine, *Astron. and Astrophys.* **389**, 871 (2002).
6. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **558**, A53 (2013).
7. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
8. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **595**, A1 (2016).

9. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), ArXiv e-prints (2018).
10. H. L. Johnson and W. W. Morgan, *Astrophys. J.* **117**, 313 (1953).
11. Y. Chen, L. Girardi, A. Bressan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444**, 2525 (2014).
12. Y. Chen, A. Bressan, L. Girardi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **452**, 1068 (2015).
13. J. Tang, A. Bressan, P. Rosenfield, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **445**, 4287 (2014).
14. A. Henden and U. Munari, *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **43**, 518 (2014).
15. A. A. Henden, M. Templeton, D. Terrell, et al., *VizieR Online Data Catalog* **2336** (2016).
16. T. Naylor and R. D. Jeffries, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **373**, 1251 (2006).
17. R. D. Jeffries, J. M. Oliveira, T. Naylor, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **376**, 580 (2007).
18. N. J. Mayne, T. Naylor, S. P. Littlefair, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **375**, 1220 (2007).
19. D. G. Monet, S. E. Levine, B. Canzian, et al., *Astron. J.* **125**, 984 (2003).
20. N. Zacharias, C. Finch, and J. Frouard, *Astron. J.* **153**, 166 (2017).
21. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
22. A. Mainzer, T. Grav, J. Bauer, et al., *Astrophys. J.* **743**, 156 (2011).
23. N. Zacharias, C. Finch, J. Subasavage, et al., *Astron. J.* **150**, 101 (2015).
24. F. Bonnarel, P. Fernique, O. Bienaymé, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 33 (2000).
25. M. B. Taylor, *ASP Conf. Ser.* **351**, 666 (2006).
26. M. B. Taylor, *ASP Conf. Ser.* **347**, 29 (2005).
27. G. Riccio, M. Brescia, S. Cavuoti, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **129**, 024005 (2017).
28. W. L. Sanders, *Astron. and Astrophys.* **14**, 226 (1971).
29. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
30. J. E. O'Donnell, *Astrophys. J.* **422**, 158 (1994).
31. E. L. Fitzpatrick and D. Massa, *Astrophys. J.* **663**, 320 (2007).
32. G. A. Gontcharov, *Astrophysics* **59**, 548 (2016).
33. P. Kroupa, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **322**, 231 (2001).
34. J. E. Drew, E. Gonzalez-Solares, R. Greimel, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440**, 2036 (2014).
35. X. Luri, A. G. A. Brown, L. M. Sarro, et al., ArXiv e-prints (2018).
36. J. C. Zinn, M. H. Pinsonneault, D. Huber, and D. Stello, ArXiv e-prints (2018).
37. M. H. Pinsonneault, Y. P. Elsworth, J. Tayar, et al., ArXiv e-prints (2018).
38. A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, et al., ArXiv e-prints (2018).
39. N. Matsunaga, G. Bono, X. Chen, et al., *Space Sci. Rev.* **214**, 74 (2018).
40. T. J. T. Moore, S. L. Lumsden, N. A. Ridge, and P. J. Puxley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **359**, 589 (2005).

Complex Research of 94 Open Clusters Based on the IPHAS, GAIA DR2, and Other Surveys

L. N. Yalyalieva, A. A. Chemel, E. V. Glushkova, A. K. Dambis, and A. D. Klinchev

We determine the color excesses, photometric distances, ages, astrometric parallaxes and proper motions for 94 open clusters in the northern part of the Milky Way. We estimate the color excesses and photometric distances based on the data from IPHAS photometric survey of the northern Galactic plane using individual total-to-selective extinction ratios $R_r = A_r/E_{r-i}$ for each cluster computed via the color-difference method based on IPHAS r , i , and $H\alpha$ -band, 2MASS J -, H -, and K_s -band, WISE $W1$ -band, and Pan-STARRS i -, z -, and y -band data. The inferred R_r values vary significantly from cluster to cluster spanning the $R_r = 3.1$ – 5.2 interval with a mean and standard deviation equal to $\langle R_r \rangle = 3.99$ and $\sigma R_r = 0.34$, respectively. We identified cluster members using (1) absolute proper motions determined from individual-epoch positions of stars retrieved from IPHAS, 2MASS, URAT1, ALLWISE, UCAC5, and Gaia DR1 catalogs and positions of stars on individual Palomar Sky Survey plates reconstructed based on the data provided in USNO-B1.0 catalog and (2) absolute proper motions provided in Gaia DR2 catalog, and computed the average Gaia DR2 trigonometric parallaxes and proper motions of the clusters. The mean formal error of the inferred astrometric parallaxes of clusters is of about $7 \mu\text{as}$, however, a comparison of astrometric and photometric parallaxes of our cluster sample implies that Gaia DR2 parallaxes are, on the average, systematically underestimated by $45 \pm 9 \mu\text{as}$. This result agrees with estimates obtained by other authors using other objects. At the same time, we find our photometric distance scale to be correct within the quoted errors (the inferred correction factor is equal to unity to within a standard error of 0.025).

Keywords: *methods: data analysis — Galaxy: kinematics and dynamics*