

УДК 524.47-32

ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ: АБСОЛЮТНЫЕ СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ И ОРБИТЫ

© 2018 А. А. Чемель^{1,2}, Е. В. Глушкова^{1,2*}, А. К. Дамбис^{2**},
А. С. Расторгуев^{1,2***}, Л. Н. Ялялиева^{1,2}, А. Д. Клиничев¹

¹Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 27 февраля 2018; принята в печать 5 марта 2018

На основе кросс-идентификации объектов каталогов USNO-B1, 2MASS, URAT1, ALLWISE, UCAC5 и Gaia DR1 с последующей редукцией в систему Gaia DR1 TGAS с помощью промежуточного опорного каталога UCAC5 — всего до 10 положений на звезду с разностью эпох до 65 лет — определены абсолютные собственные движения с характерной точностью 1–2 миллисекунд дуги в год для звезд в окрестности 30 угловых минут от центров 115 шаровых скоплений нашей Галактики. По собственным движениям для фотометрически выделенных членов скоплений из числа звезд горизонтальной ветви и ветви красных гигантов определены абсолютные собственные движения скоплений с характерной точностью около 0.4 миллисекунд дуги в год. На основании этих собственных движений и опубликованных значений лучевых скоростей и гелиоцентрических расстояний скоплений вычислены орбиты скоплений для модели Галактики, состоящей из диска Миямото–Нагаи, сфероида Хернквиста и модифицированного гало темного вещества (осесимметричная модель без бара) и для такой же модели с добавлением вращающегося бара Ферре (неосесимметричная модель). Вычисленные пространственные скорости пяти скоплений оказались больше скорости убегания — по-видимому, из-за больших ошибок собственных движений), а вычисленные орбиты остальных скоплений остаются в пределах Галактики. В отличие от результатов, опубликованных ранее другими авторами, согласно нашим расчетам, бар оказывает заметное влияние на орбиты большинства скоплений, включая расположенные на больших расстояниях от Галактического центра. Влияние бара проявляется в существенной хаотизации частей орбит, расположенных ближе к Галактическому центру, и в вытягивании орбит некоторых скоплений толстого диска.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Шаровые скопления — важные индикаторы кинематического состояния Галактического гало и балджа от самых внутренних областей Галактики до далекой периферии. Несмотря на сравнительно малое число шаровых скоплений (около 150), имеющаяся выборка этих объектов (каталог Харриса [1]) отличается высокой степенью полноты по сравнению с другими, более многочисленными кинематическими индикаторами (например, переменными типа RR Лиры и звездами голубой горизонтальной ветви). К тому же, поскольку скопления представляют собой группы звезд,

оценки их основных параметров (расстояний, содержания тяжелых элементов, лучевых скоростей и т.д.) отличаются более высокой точностью и надежностью по сравнению с соответствующими оценками для отдельных звезд. Но в отличие о ситуации с пространственным распределением популяции шаровых скоплений, которое известно с весьма хорошей точностью, кинематическая картина этой популяции остается неполной из-за того, что при ее изучении приходилось опираться только на одну компоненту скорости — ее проекцию вдоль луча зрения — поскольку только она известна с более или менее приемлемой точностью для большинства скоплений. Имеющиеся данные об абсолютных собственных движениях шаровых скоплений [2–20] остаются весьма неполными, недостаточно точными и ненадежными. В данной работе предпринята попытка определения на основе данных опубликованных в последние два

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

**E-mail: dambis@yandex.ru

***E-mail: alex.rastorguev@gmail.com

десять лет больших обзоров неба (USNO-B1.0 [23], 2MASS [24], URAT1 [25], WISE [26, 27] и Gaia [28]), эпохи позиционных данных которых охватывают период с 1950 по 2015 гг., абсолютных собственных движений звезд в полях шаровых скоплений, выделения вероятных членов скоплений и вычисления средних собственных движений для большинства известных шаровых скоплений, содержащихся в каталогах. Чтобы предварительно подтвердить наш результат, мы оценили компоненты средних скоростей и компоненты дисперсий скоростей для подвыборки малометаллических шаровых скоплений ($[Fe/H] < -1.0$) и вычислили для всех скоплений нашей выборки Галактические орбиты.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Первая задача настоящей работы — вычисление абсолютных собственных движений звезд в полях шаровых скоплений, выделение вероятных членов скоплений и определение средних собственных движений скоплений путем осреднения собственных движений их выделенных членов.

Сначала для каждого рассматриваемого скопления определяются собственные движения большинства звезд в его поле на основе положений, реконструированных по данным ряда самых обширных обзоров неба (USNO-B1.0, 2MASS, WISE, URAT1, UCAC5, GAIA DR1) с хорошими позиционными данными.

На первом этапе выполняется кросс-идентификация звезд упомянутых обзоров, для чего была разработана написанная на языке java и работающая из командной строки программа [29], представляющая собой удобный интерфейс к известной программе STILTS [30]. Исходные тексты программы CROSSMATCH доступны в виде архива по адресу www.sai.msu.ru/groups/cluster/cl/crossmatch/Crossmatch_4.3.0.zip. С помощью этой программы для каждого шарового скопления выполняется кросс-идентификация звезд перечисленных каталогов в пределах 30 угловых минут от центра скопления с радиусом отождествления, равным 1 или 2 угловым секундам.

На следующем этапе приводимые в обзорах положения звезд редуцируются в систему, задаваемую положениями и собственными движениями каталога Gaia DR1. Трудность состоит в том, что хотя надежные высокоточные положения на эпоху 2015.0 известны для более, чем одного миллиарда звезд, собственные движения в первой версии каталога Gaia (Gaia DR1) приведены только для более 2 миллионов звезд, относящихся к подмножеству Gaia TGAS [22], которых явно недостаточно для астрометрической редукации в рассматриваемых полях скоплений по следующим двум причинам:

1. Недостаточное количество звезд подмножества Gaia TGAS в рассматриваемых полях скоплений.

2. Подмножество Gaia TGAS состоит из слишком ярких звезд, изображения которых сильно передедержаны и поэтому определенные по таким изображениям положения звезд не могут использоваться для редукации положений основной массы объектов в рассматриваемых полях, представленной более слабыми звездами.

Эта проблема решается путем использования в качестве опорного вместо Gaia FR1 TGAS гораздо более глубокого и обширного каталога UCAC5 [21]. Согласно описанию UCAC5, этот каталог может рассматриваться в качестве хорошего продолжения системы положений и собственных движений Gaia DR1 TGAS на более слабые объекты до предельных величин 16.0^m и даже более слабых. Поэтому в данной работе мы используем опубликованные положения из каталога UCAC5 в неизменном виде без каких бы то ни было поправок. Естественно, мы точно также принимаем без изменений опубликованные положения каталога Gaia DR1 на эпоху 2015.0. Опубликованные положения обзора ALLWISE на эпоху MJD = 55400.0 (2010.5589) редуцировались в систему каталога UCAC5 посредством обычного линейного преобразования координат в касательной плоскости и та же процедура применялась для опубликованных координат обзоров 2MASS и URAT1. Положения звезд на шмидтовских пластинках фотографических обзоров, использованных при построении каталога USNO-B1.0 [23], восстанавливаются исходя из данных, приведенных в этом каталоге (положение на эпоху J2000.0, компоненты собственных движений и компоненты отклонения в тангенциальной плоскости — $B1_\xi, B2_\xi, R1_\xi, R2_\xi, I_\xi$ и $B1_\eta, B2_\eta, R1_\eta, R2_\eta, I_\eta$ — вдоль осей x и y). Полученные таким образом координаты редуцируются в систему каталога UCAC5 с использованием опорных звезд в радиусе 30 угловых минут от центра скопления и эпох пластинок из каталога Объединенной службы архивации изображений и каталогов флагстафской станции Военно-морской обсерватории США www.nofs.navy.mil/data/fchpix/cfhelp.html#plogs ([31]). В результате мы получаем до 10 редуцированных положений на звезду (до пяти положений на шмидтовских пластинках, реконструированных по данным каталога USNO-B1.0 + положения из каталогов Gaia DR1 и UCAC5 + редуцированные положения по данным каталогов 2MASS, URAT1 и WISE для звезд севернее склонения $\delta = -33^\circ 0'$, и до трех положений на шмидтовских пластинках, реконструированных по данным каталога USNO-B1.0 + положения из каталогов Gaia DR1 и UCAC5 + редуцированные

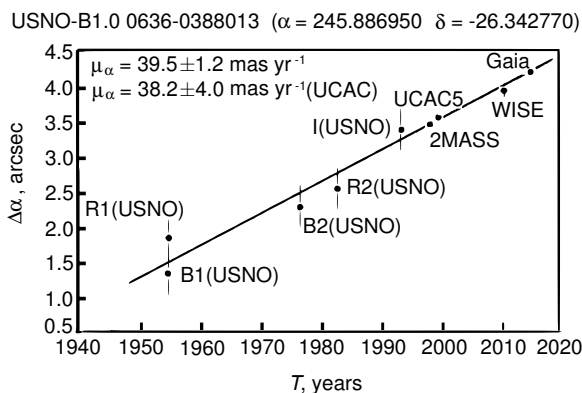


Рис. 1. Зависимость прямого восхождения звезды USNO-B1.0 0636-0388013, редуцированного в систему каталога UCAC5, от эпохи наблюдения. Сплошная линия представляет линейную аппроксимацию по методу наименьших квадратов, использованную для определения собственного движения.

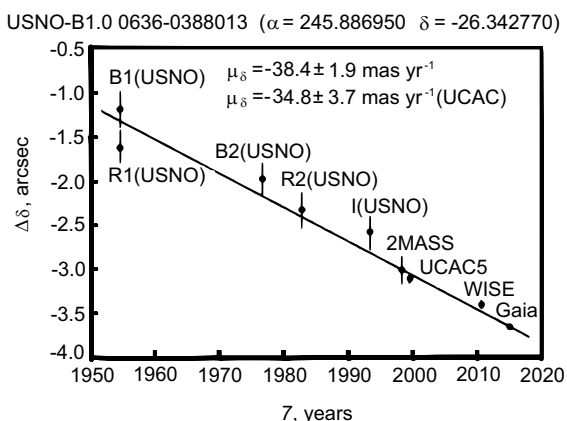


Рис. 2. Зависимость склонения звезды USNO-B1.0 0636-0388013, редуцированного в систему каталога UCAC5, от эпохи наблюдения. Сплошная линия представляет линейную аппроксимацию по методу наименьших квадратов, использованную для определения собственного движения.

положения по данным каталогов 2MASS и WISE для звезд южнее склонения $\delta = -33^\circ 0'$). Общий диапазон эпох наблюдений достигает примерно 65 лет для звезд севернее склонения $\delta = -33^\circ 0'$ и 30–35 лет для звезд южнее этого склонения.

Описанная выше процедура проиллюстрирована на рис. 1 и рис. 2, где приведены зависимости прямого восхождения и склонения звезды USNO-B1.0 0636-0388013 от эпохи наблюдения. Точки с интервалами ошибок изображают реконструированные значения соответствующих координат, а сплошные линии — линейные МНК аппроксимации, использованные для определения компонентов собственного движения. Видно, что дополнительные позиционные данные позволяют

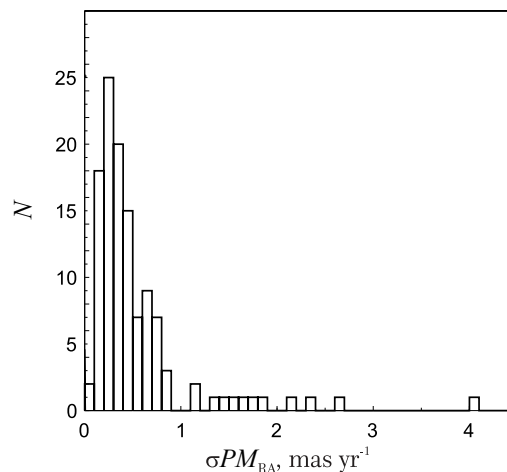


Рис. 3. Распределение ошибок компонентов собственных движений скоплений по прямому восхождению, σPM_{RA} .

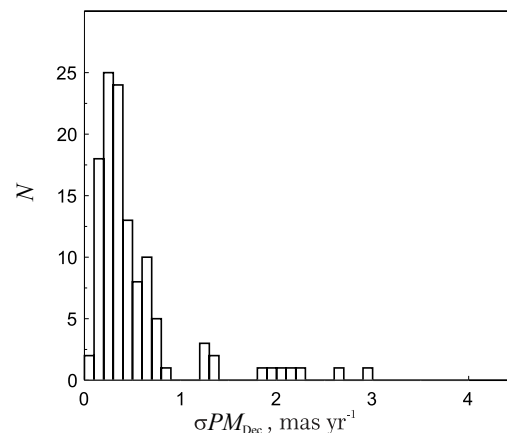


Рис. 4. Распределение ошибок компонентов собственных движений скоплений по склонению, σPM_{DEC} .

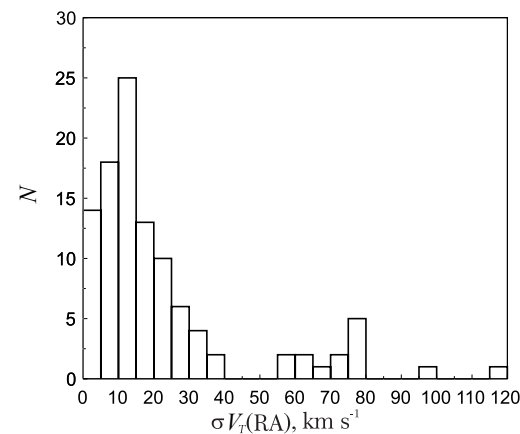


Рис. 5. Распределение ошибок компонентов поперечной скорости по прямому восхождению σV_T (RA) для 106 скоплений с ошибками компонент собственных движений $\sigma PM_{RA} \leq 1$ миллисекунда дуги в год и $\sigma PM_{Dec} \leq 1$ миллисекунда дуги в год.

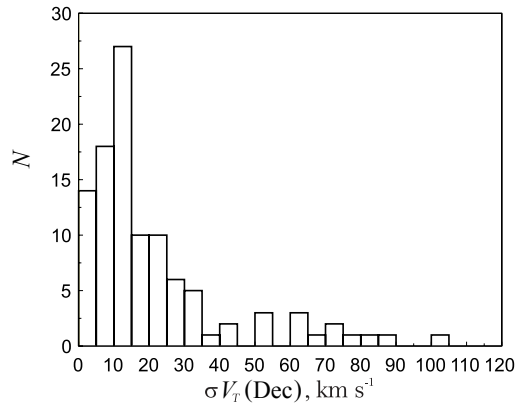


Рис. 6. Распределение ошибок компонент поперечной скорости по прямому восхождению σV_T (Dec) для 106 скоплений с ошибками компонент собственных движений $\sigma PM_{RA} \leq 1$ миллисекунда дуги в год и $\sigma PM_{Dec} \leq 1$ миллисекунда дуги в год.

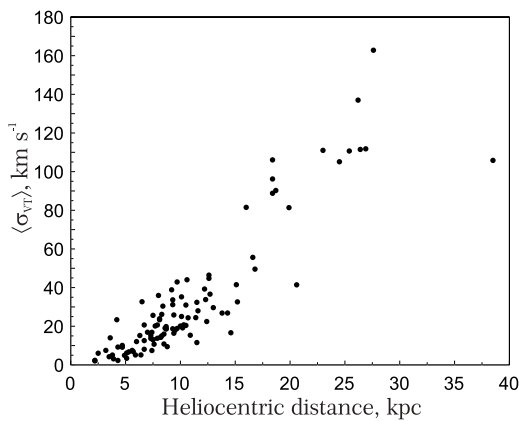


Рис. 7. Зависимость суммарной ошибки поперечной скорости $\langle \sigma_{VT} \rangle = (\sigma V_T(RA)^2 + \sigma V_T(Dec)^2)^{1/2}$ от расстояния до скопления для 106 скоплений с ошибками компонент собственных движений $\sigma PM_{RA} \leq 1$ миллисекунда дуги в год и $\sigma PM_{Dec} \leq 1$ миллисекунда дуги в год.

существенно повысить точность определения компонент собственного движения по сравнению со значениями из каталога UCAC5.

Далее мы выделили в полях скоплений звезды, расположенные на горизонтальной ветви и ветви красных гигантов на диаграммах цвет–величина, построенных на основе данных обзора 2MASS, и вычислили средние компоненты собственных движений этих звезд по прямому восхождению и склонению.

Для оценки надежности принятого метода мы таким же образом вычислили собственные движения близких шаровых скоплений (т.е., скоплений, у которых звезды горизонтальной ветви и ветви красных гигантов оказываются заведомо ярче предельной величины каталога UCAC5) на основе

данных об исходных собственных движений каталога UCAC5 и сравнили полученные средние собственные движения с результатами, полученными по собственным движениям более слабых звезд главной последовательности этих же скоплений, определенных по редуцированным положениям из обзоров USNO-B1.0, 2MASS, URAT1 и WISE в сочетании с положениями из каталогов UCAC5 и GAIA DR1 (при их наличии) в соответствии с вышеописанной процедурой. Хорошее согласие результатов, полученных по ярким и слабым звездам, подтверждает надежность принятой процедуры и отсутствие существенных систематических ошибок, зависящих от блеска.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Собственные движения и их ошибки

Вышеописанная методика была применена для определения абсолютных собственных движений звезд в полях 115 шаровых скоплений нашей Галактики и вычисления их средних собственных движений. Индивидуальные результаты для каждого скопления представлены в таблице 1. В первых двух столбцах приводятся значения экваториальных координат центров скоплений на эпоху J2000.0. В (3) и (4) столбцах приводится основное и альтернативное названия скопления. В столбце (5) приводится видимый приливной радиус скопления, а в столбцах (6) и (7), соответственно, видимая величина горизонтальной ветви в полосе V и видимый модуль расстояния в этой полосе. В столбцах (8) и (9) приводятся среднее значение компонента собственного движения по прямому восхождению и его среднеквадратичная ошибка в миллисекундах дуги в год. В столбцах (10) и (11) приводятся соответствующие значения среднего компонента собственного движения по склонению и его среднеквадратичная ошибка в миллисекундах дуги в год. В столбцах (12) и (13) приводятся значения Галактических координат центра скопления. В столбцах (14), (15), (16) и (17) приводятся значения средней гелиоцентрической лучевой скорости скопления, расстояния скопления от Солнца, значение избытка цвета E_{B-V} и металличность $[Fe/H]$. Большая часть данных в таблице взята из каталога Харриса [1] за исключением компонент собственных движений (столбцы (8)–(11)) и значений лучевых скоростей скоплений E3, ESO452-SC11, и Djorg 2, которые взяты, соответственно, из статей [32], [33] и [34]. На рис. 3 и 4 приведены гистограммы распределения формальных ошибок полученных значений компонент собственных движений скоплений, соответственно, по прямому восхождению и склонению. Медианные значения ошибок по прямому восхождению и склонению составляют, соответственно, 0.36 и 0.35 миллисекунд дуги

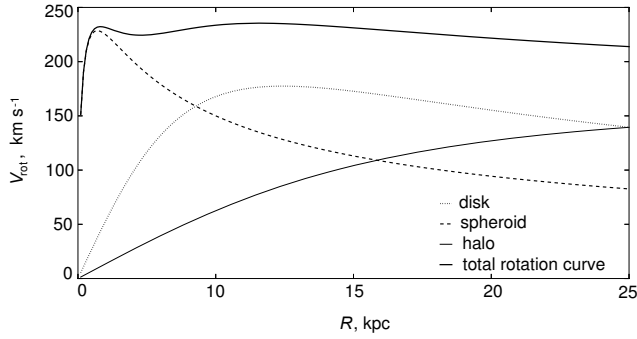


Рис. 8. Декомпозиция кривой вращения, построенной на основе осесимметричной составляющей гравитационного потенциала Галактики.

в год. На рис. 5 и 6 приведены распределения ошибок компонент поперечных скоростей в направлении прямого восхождения (σV_T (RA)) и склонения (σV_T (Dec)), чьи медианные значения равны, соответственно, 17 и 16 км с⁻¹. На рис. 7 приводится зависимость суммарной ошибки поперечной скорости $\langle \sigma_{VT} \rangle = (\sigma V_T$ (RA)² + σV_T (Dec)²)^{1/2} от расстояния до скопления.

3.2. Модель галактического потенциала

В рамках данной работы использовалась модель гравитационного потенциала Галактики, включающая в себя как осесимметричную, так и неосесимметричную составляющие. Осесимметричная составляющая потенциала была представлена тремя компонентами: диск Миямото–Нагаи [35], сфероид Хернквиста [36] и модифицированное темное гало. Выражения для потенциалов этих трех компонент имеют следующий вид:

$$\phi_{\text{disk}} = -\frac{GM_{\text{disk}}}{\sqrt{R^2 + \left(a + \sqrt{z^2 + b^2}\right)^2}}; \quad (1)$$

$$\phi_{\text{spher}} = -\frac{GM_{\text{spher}}}{\sqrt{R^2 + z^2 + c}}; \quad (2)$$

$$\phi_{\text{halo}} = V_{\text{halo}}^2 \ln(R^2 + z^2 + d^2). \quad (3)$$

Для используемых в данных выражениях констант принимались следующие значения: $a = 5$, $b = 0.26$, $c = 0.7$, $d = 12$, $M_{\text{spher}} = 3.4 \times 10^{10} M_{\odot}$, $M_{\text{disk}} = 10^{11} M_{\odot}$, $V_{\text{halo}} = 1.15$ (все расстояния приведены в килопарсеках). Эти константы были подобраны нами таким образом, чтобы обеспечить согласие с кривой вращения, построенной на основе современных данных о кинематике галактических мазеров [37], что обеспечивает круговую скорость вращения на солнечном расстоянии (в рамках данной работы принималось равным $R_0 = 8.3$ кпк) около 237 км с⁻¹.

Неосесимметричная составляющая гравитационного потенциала была представлена галактическим баром. В качестве модели гравитационного потенциала бара использовалась модель бара Феррера с показателем $n = 2$ [38]. В рамках этой модели бар представляет собой эллипсоид вращения с большой полуосью $a_{\text{bar}} = 4$ кпк и малой полуосью $c_{\text{bar}} = 1$ кпк, ось вращения которого расположена в плоскости симметрии Галактики. Закон распределения плотности в использованной модели бара имеет следующий вид:

$$\rho = \begin{cases} \rho_0(1 - m^2)^2 & m < 1 \\ 0 & m \geq 1, \end{cases} \quad (4)$$

где $m^2 = x^2/a_{\text{bar}}^2 + (y^2 + z^2)/c_{\text{bar}}^2$. Выражение для гравитационного потенциала с прямоугольной системе координат, связанной с баром (ось x направлена вдоль большой полуоси бара, ось z направлена а сторону северного полюса Галактики, ось y направлена вдоль малой полуоси и дополняет координатные оси до правой тройки) представляется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{bar}} = & -\frac{105 GM_{\text{bar}}}{32\varepsilon} \left[\frac{1}{3} w_{10} - \left((y^2 + z^2) w_{20} \right. \right. \\ & + x^2 w_{11} \left. \right) + \left((y^2 + z^2)^2 w_{30} + 2(y^2 + z^2) x^2 w_{21} \right. \\ & + x^4 w_{12} \left. \right) - \frac{1}{3} \left((y^2 + z^2)^3 w_{40} + 3(y^2 + z^2)^2 \right. \\ & \left. \left. \times x^2 w_{31} + 3(y^2 + z^2) x^4 w_{22} + x^6 w_{13} \right) \right], \quad (5) \end{aligned}$$

где параметр $\varepsilon^2 = a_{\text{bar}}^2 - c_{\text{bar}}^2$. Координаты x, y, z в формуле (5) являются обезразмеренными путем деления на параметр ε . Интегральные коэффициенты w_{ij} определяются следующим образом:

$$w_{ij}(\psi) = 2 \int_0^\psi \text{tg}^{2i-1} \theta \sin^{2j-1} \theta d\theta, \quad (6)$$

где $\psi(x, y, z)$ — функция координат, равная решению уравнения

$$\begin{aligned} (y^2 + z^2) \text{tg}^2 \psi + x^2 \sin^2 \psi &= \varepsilon^2 & m > 1 \\ \cos \psi &= c_{\text{bar}}/a_{\text{bar}} & m \leq 1. \end{aligned} \quad (7)$$

В рамках данной работы предполагалось, что угол ориентации бара в настоящее время составляет 45° относительно направления на Солнце (первый квадрант). Угловая скорость вращения бара принималась равной 50 км с⁻¹ кпк⁻¹. Также предполагалось, что масса бара Галактики составляет 10% от массы галактического диска и равна $M_{\text{bar}} = 10^{10} M_{\odot}$.

Таблица 1. Параметры шаровых скоплений

RA2000	Dec2000	Название	Альтернативное название	R_{tidal} , arcmin	V (НВ)	DM	μ_{mra} , mas yr $^{-1}$	μ_{mra} , mas yr $^{-1}$	μ_{mde} , mas yr $^{-1}$	μ_{mde} , mas yr $^{-1}$	l , deg	b , deg	V_r , km s $^{-1}$	D_{hel} , kpc	E_{B-V}	[Fe/H]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
265.1721	-53.6736	NGC 6397		15.811	12.87	12.31	2.33	0.14	-17.46	0.14	338.17	-11.96	18.9	2.2	0.18	-1.95
245.8979	-26.5253	NGC 6121	M 4	32.291	13.45	12.78	-12.48	0.16	-18.40	0.15	350.97	15.97	70.2	2.2	0.36	-1.20
287.7158	-59.9819	NGC 6752		53.759	13.70	13.08	-1.93	0.12	-4.80	0.12	336.50	-25.63	-24.5	3.9	0.04	-1.55
006.0217	-72.0808	NGC 104	47 Tuc	40.570	14.06	13.32	4.84	0.08	-3.36	0.08	305.90	-44.89	-18.7	4.3	0.05	-0.76
279.1008	-23.9033	NGC 6656	M 22	28.993	14.15	13.55	9.36	0.35	-6.62	0.34	9.89	-7.55	-148.9	3.2	0.34	-1.64
294.9975	-30.9622	NGC 6809	M 55	16.285	14.40	13.82	-3.90	0.19	-9.82	0.19	8.80	-23.27	174.8	5.3	0.07	-1.81
298.4421	+18.7783	NGC 6838	M 71	8.899	14.44	13.70	-5.44	0.20	-2.88	0.20	56.74	-4.56	-22.9	3.8	0.25	-0.73
201.6912	-47.4769	NGC 5139	ω Cen	44.835	14.53	13.92	-3.41	0.10	-6.84	0.10	309.10	14.97	232.3	5.1	0.12	-1.62
251.8104	-1.9478	NGC 6218	M 12	15.832	14.60	13.97	1.72	0.32	-4.98	0.27	15.72	26.31	-42.1	4.7	0.19	-1.48
254.2871	-4.0994	NGC 6254	M 10	21.602	14.65	14.03	-4.46	0.32	-7.10	0.29	15.14	23.08	75.8	4.3	0.28	-1.52
154.4033	-46.4111	NGC 3201		29.605	14.80	14.17	9.66	0.18	-2.51	0.18	277.23	8.64	494.0	5.1	0.21	-1.48
140.2471	-77.2825	E 3		10.516	14.80	14.07	-1.65	0.83	3.27	0.65	292.27	-19.02	45.0	4.2	0.30	-0.80
271.8358	-24.9975	NGC 6544		2.133	14.90	14.28	-3.01	0.36	-11.70	0.35	5.84	-2.20	-27.3	2.5	0.74	-1.56
250.4229	+36.4603	NGC 6205	M 13	27.195	14.90	14.28	-2.03	0.36	0.83	0.38	59.01	40.91	-246.6	7.0	0.02	-1.54
229.6408	+2.0828	NGC 5904	M 5	29.652	15.07	14.41	4.05	0.28	-5.44	0.34	3.86	46.80	52.1	7.3	0.03	-1.29
259.2804	+43.1364	NGC 6341	M 92	14.850	15.10	14.59	-4.16	0.43	2.32	0.51	68.34	34.86	-121.6	8.1	0.02	-2.29
325.0917	-23.1792	NGC 7099	M 30	18.974	15.10	14.57	0.67	0.39	-6.01	0.40	27.18	-46.83	-184.2	7.9	0.03	-2.12
261.3717	-48.4228	NGC 6352		10.449	15.13	14.39	-2.45	0.20	-4.03	0.21	341.42	-7.17	-120.9	5.6	0.21	-0.70
272.0092	-43.7056	NGC 6541		30.000	15.30	14.72	-1.36	0.34	-6.90	0.36	349.29	-11.18	-156.2	7.4	0.12	-1.83
271.5358	-27.7653	NGC 6540	Djorg3	9.487	15.30	14.60	-4.86	0.18	-2.92	0.17	3.29	-3.31	-17.7	3.5	0.60	-1.00
186.4392	-72.6592	NGC 4372		34.917	15.30	14.76	-5.99	0.15	2.82	0.15	300.99	-9.88	72.3	4.9	0.42	-2.09
013.1979	-26.5900	NGC 288		12.951	15.30	14.64	4.27	0.44	-1.66	0.40	152.28	-89.38	-46.6	8.1	0.03	-1.24
262.9783	-67.0481	NGC 6362		16.618	15.34	14.65	-5.27	0.26	-5.63	0.26	325.55	-17.57	-13.1	7.5	0.09	-1.06

Таблица 1. (Продолжение)

RA2000	Dec2000	Название	Альтернативное название	R_{tidal} , arcmin	$V(\text{HB})$	DM	μ_{mra} , mas yr $^{-1}$	e_{pmra} , mas yr $^{-1}$	μ_{mde} , mas yr $^{-1}$	e_{pmde} , mas yr $^{-1}$	l , deg	b , deg	V_r , km s $^{-1}$	D_{hel} , kpc	E_{B-V}	[Fe/H]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
015.8096	-70.8483	NGC 362		14.806	15.43	14.75	7.27	0.47	-2.06	0.47	301.53	-46.25	223.5	8.3	0.05	-1.16
194.8958	-70.8747	NGC 4833		17.783	15.45	14.87	-7.27	0.13	-2.29	0.13	303.61	-8.01	200.2	5.9	0.33	-1.79
284.8883	-36.6317	NGC 6723		10.547	15.50	14.82	1.07	0.33	-3.55	0.34	0.07	-17.30	-94.5	8.6	0.05	-1.12
280.8029	-32.2919	NGC 6681	M 70	9.487	15.55	14.93	0.24	0.32	-6.75	0.32	2.85	-12.51	218.6	8.7	0.07	-1.51
283.7758	-22.7008	NGC 6717	Pal 9	9.399	15.56	14.90	-5.59	1.16	-7.27	2.07	12.88	-10.90	22.8	7.1	0.21	-1.29
261.9346	-5.0767	NGC 6366		15.221	15.65	14.92	-0.02	0.58	-5.52	0.61	18.41	16.04	-122.3	3.6	0.69	-0.82
205.5467	+28.3756	NGC 5272	M 3	35.397	15.65	15.04	-1.39	0.30	-1.62	0.27	42.21	78.71	-148.6	10.0	0.01	-1.57
189.8667	-26.7428	NGC 4590	M 68	30.120	15.68	15.14	-1.96	0.52	2.49	0.48	299.63	36.05	-95.2	10.1	0.04	-2.06
248.1329	-13.0536	NGC 6171	M 107	17.474	15.70	15.01	0.19	0.36	-7.43	0.33	3.37	23.01	-33.8	6.3	0.33	-1.04
276.1371	-24.8700	NGC 6626	M 28	11.226	15.70	15.07	-0.81	0.18	-6.85	0.18	7.80	-5.58	17.0	5.7	0.41	-1.45
270.9612	-0.2969	NGC 6535		8.380	15.73	15.15	-6.35	5.07	3.70	5.47	27.18	10.44	-215.1	6.8	0.32	-1.80
322.4929	+12.1669	NGC 7078	M 15	22.136	15.83	15.31	0.11	0.28	-2.79	0.28	65.01	-27.31	-107.5	10.2	0.09	-2.22
278.9404	-32.9903	NGC 6652		4.417	15.85	15.14	-2.39	0.41	-5.14	0.39	1.53	-11.38	-111.7	9.4	0.09	-0.96
277.8467	-32.3481	NGC 6637	M 69	8.346	15.85	15.11	-5.01	0.26	-6.70	0.27	1.72	-10.27	39.9	8.2	0.17	-0.71
244.2604	-22.9750	NGC 6093	M 80	13.369	15.86	15.25	-2.17	0.32	-5.86	0.30	352.67	19.46	9.3	8.7	0.18	-1.62
272.5767	-31.7636	NGC 6558		9.487	15.97	15.34	-1.38	0.12	-5.50	0.20	0.20	-6.03	-143.7	6.4	0.42	-1.44
323.3721	-0.8231	NGC 7089	M 2	21.453	16.05	15.44	1.46	0.32	-2.43	0.38	53.38	-35.78	-5.3	11.4	0.05	-1.62
102.2467	-36.0053	NGC 2298		6.479	16.11	15.54	3.25	0.62	-2.85	0.64	245.63	-16.01	148.9	10.6	0.13	-1.85
078.5262	-40.0472	NGC 1851		13.902	16.15	15.49	1.72	0.48	-0.10	0.44	244.51	-35.04	320.9	12.2	0.02	-1.26
081.0442	-24.5242	NGC 1904	M 79	8.397	16.15	15.53	0.43	0.53	-1.05	0.44	227.23	-29.35	207.5	12.6	0.01	-1.54
289.1479	+30.1847	NGC 6779	M 56	8.674	16.16	15.60	-2.10	2.68	2.33	2.64	62.66	8.34	-135.7	9.9	0.20	-1.94
138.0108	-64.8631	NGC 2808		15.310	16.19	15.55	1.26	0.30	-0.05	0.28	282.19	-11.25	93.6	9.3	0.23	-1.37
283.2679	-8.7061	NGC 6712		7.467	16.25	15.55	2.98	0.28	-6.03	0.27	25.35	-4.32	-107.7	6.7	0.46	-1.01

Таблица 1. (Продолжение)

RA2000	Dec2000	Название	Альтернативное название	R_{tidal} , arcmin	V (НВ)	DM	μ_{mra} , mas yr $^{-1}$	e_{pmra} , mas yr $^{-1}$	μ_{mde} , mas yr $^{-1}$	e_{pmde} , mas yr $^{-1}$	l , deg	b , deg	V_r , km s $^{-1}$	D_{hel} , kpc	E_{B-V}	[Fe/H]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
255.3025	-30.1122	NGC 6266	M 62	9.021	16.25	15.59	-3.69	0.18	-1.85	0.17	353.58	7.32	-65.8	6.7	0.47	-1.29
258.6354	-29.4622	NGC 6304		13.250	16.25	15.49	-2.71	0.30	-1.90	0.28	355.83	5.38	-107.3	6.0	0.52	-0.59
259.7992	-18.5164	NGC 6333	M 9	8.193	16.30	15.71	-2.69	0.27	-4.22	0.26	5.54	10.70	229.1	8.3	0.36	-1.72
277.9762	-23.4764	NGC 6642		9.772	16.30	15.65	0.26	0.21	-4.00	0.18	9.81	-6.44	-57.2	7.6	0.40	-1.35
229.3521	-21.0103	NGC 5897		12.085	16.35	15.77	-6.36	0.43	-3.97	0.46	342.95	30.29	101.5	12.7	0.08	-1.80
255.6571	-26.2681	NGC 6273	M 19	14.570	16.40	15.80	-4.09	0.19	0.91	0.20	356.87	9.38	135.0	8.5	0.37	-1.68
269.7583	-44.2650	NGC 6496		5.262	16.47	15.72	-1.98	0.36	-8.57	0.40	348.02	-10.01	-112.7	11.6	0.13	-0.64
257.5433	-26.5817	NGC 6293		15.811	16.50	15.94	0.65	0.16	-3.97	0.16	357.62	7.83	-98.9	8.8	0.39	-1.92
236.5146	-37.7861	NGC 5986		10.455	16.50	15.90	-4.49	0.30	-3.12	0.29	337.02	13.27	88.9	10.3	0.27	-1.67
277.7342	-25.4964	NGC 6638		6.531	16.50	15.80	-2.49	0.26	-3.97	0.26	7.90	-7.15	18.1	8.2	0.40	-0.99
206.6104	-51.3733	NGC 5286		8.364	16.50	15.90	-3.00	0.34	0.13	0.32	311.61	10.57	58.3	10.7	0.24	-1.67
274.6571	-52.2150	NGC 6584		9.351	16.53	15.90	0.87	0.34	-5.52	0.35	342.14	-16.41	222.9	13.0	0.11	-1.49
246.4525	-72.2017	NGC 6101		7.256	16.60	16.02	0.70	0.41	-1.59	0.42	317.75	-15.82	361.4	15.1	0.04	-1.82
232.0021	-50.6728	NGC 5927		16.721	16.60	15.81	-4.92	0.15	-3.20	0.14	326.60	4.86	-115.7	7.4	0.47	-0.37
246.8087	-26.0247	NGC 6144		33.352	16.60	16.01	-3.98	0.37	-10.79	0.38	351.93	15.70	188.9	10.1	0.32	-1.73
272.3150	-25.9078	NGC 6553		8.135	16.60	15.79	-2.35	0.29	-2.35	0.27	5.25	-3.02	-6.5	4.7	0.78	-0.25
211.3637	+28.5344	NGC 5466		52.754	16.62	16.10	-4.40	0.50	-3.87	0.54	42.15	73.59	107.7	16.6	0.00	-2.22
199.1125	+17.6981	NGC 5053		14.866	16.65	16.14	3.38	1.83	2.15	1.85	335.69	78.94	44.0	16.2	0.03	-2.29
249.8562	-28.3978	1636-283	ESO 452-SC11	7.697	16.66	15.96	-7.10	1.50	-5.1	1.4	351.91	12.10	17.5	7.6	0.50	-1.15
253.3558	-22.1772	NGC 6235		7.262	16.70	16.06	-3.34	0.66	-8.81	0.72	358.92	13.52	87.3	9.7	0.36	-1.40
048.0637	-55.2169	NGC 1261		9.171	16.70	16.05	1.78	0.76	-2.06	0.71	270.54	-52.13	68.2	16.0	0.01	-1.35
308.5483	+7.4042	NGC 6934		15.811	16.90	16.28	-3.12	0.32	-4.07	0.34	52.10	-18.89	-411.4	15.2	0.12	-1.54
198.2304	+18.1692	NGC 5024	M 53	8.471	16.90	16.36	0.10	0.72	-1.92	0.58	332.96	79.76	-79.1	18.4	0.01	-2.07

Таблица 1. (Продолжение)

RA2000	Dec2000	Название	Альтернативное название	R_{tidal} , arcmin	$V(\text{HB})$	DM	μ_{mra} , mas yr $^{-1}$	e_{pmra} , mas yr $^{-1}$	ρ_{mde} , mas yr $^{-1}$	e_{pmde} , mas yr $^{-1}$	l , deg	b , deg	V_r , km s $^{-1}$	D_{hel} , kpc	E_{B-V}	[Fe/H]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
313.3662	-12.5369	NGC 6981	M 72	22.295	16.90	16.28	-1.53	0.44	-4.17	0.44	35.16	-32.68	-345.1	16.8	0.05	-1.54
260.2925	-19.5872	NGC 6342		10.351	16.90	16.15	-0.78	2.40	-8.62	2.29	4.90	9.73	80.9	9.1	0.44	-0.65
256.2892	-22.7081	NGC 6287		6.310	17.00	16.46	-4.62	0.54	-1.65	0.63	0.13	11.02	-208.0	8.4	0.59	-2.05
182.5258	+18.5419	NGC 4147		17.549	17.01	16.43	-4.07	2.15	-0.93	2.12	252.85	77.19	183.2	18.8	0.02	-1.83
273.4121	-31.8264	NGC 6569		17.419	17.10	16.38	-1.78	0.28	-7.45	0.24	0.48	-6.68	-28.1	8.5	0.56	-0.86
267.5537	-37.0511	NGC 6441		6.890	17.10	16.33	-3.00	0.29	-5.61	0.32	353.53	-5.01	18.3	9.7	0.45	-0.53
326.6617	-21.2508	Pal 12		33.043	17.13	16.42	-1.21	0.72	-1.91	0.68	30.51	-47.68	27.8	18.7	0.02	-0.93
264.4004	-3.2458	NGC 6402	M 14	15.811	17.20	16.56	-2.76	0.34	-7.53	0.35	21.32	14.81	-66.1	8.7	0.60	-1.39
264.0708	-44.7350	NGC 6388		13.554	17.25	16.49	-1.25	0.15	-3.67	0.15	345.56	-6.74	81.2	11.5	0.38	-0.60
280.3746	-19.8258	Pal 8		22.136	17.27	16.49	-3.13	0.27	-5.89	0.29	14.10	-6.80	-43.0	12.4	0.33	-0.48
256.1200	-24.7647	NGC 6284		9.796	17.30	16.65	-3.00	0.28	-0.30	0.27	358.35	9.94	29.7	14.3	0.28	-1.32
296.3100	-8.0072	Pal 11		7.586	17.35	16.56	-0.94	0.55	-2.97	0.53	31.81	-15.58	-68.0	12.6	0.34	-0.39
301.5200	-21.9214	NGC 6864	M 75	7.975	17.47	16.82	-0.71	0.86	2.37	0.84	20.30	-25.75	-189.3	18.4	0.16	-1.32
287.8004	+1.0306	NGC 6760		15.937	17.50	16.73	0.87	0.31	-2.51	0.31	36.11	-3.92	-27.5	7.3	0.78	-0.52
260.8958	-17.8131	NGC 6356		12.838	17.50	16.73	-4.40	0.17	-5.12	0.19	6.72	10.22	27.0	14.6	0.29	-0.50
225.0771	-82.2136	IC 4499		12.244	17.65	17.04	1.59	0.78	-2.20	0.72	307.35	-20.47	31.5	18.4	0.23	-1.60
267.7158	-34.5986	NGC 6453		8.360	17.70	17.08	0.71	0.21	-3.94	0.21	355.72	-3.87	-83.7	10.9	0.61	-1.53
264.6537	-23.9089	NGC 6401		22.136	17.70	17.02	-4.18	0.26	-2.32	0.28	3.45	3.98	-65.0	7.5	0.85	-1.12
217.4054	-5.9764	NGC 5634		7.334	17.75	17.17	-6.10	1.20	-6.74	1.23	342.21	49.26	-45.1	25.3	0.05	-1.82
289.4321	-34.6575	Terzan 7		6.032	17.76	17.00	-0.01	0.72	-1.92	0.64	3.39	-20.07	166.0	23.0	0.06	-0.58
259.1558	-28.1400	NGC 6316		5.012	17.78	17.01	-7.10	0.42	-3.96	0.45	357.18	5.76	71.5	11.5	0.55	-0.55
189.6675	-51.1503	Rup 106		25.298	17.80	17.22	-5.10	0.30	-6.26	0.31	300.89	11.67	-44.0	20.6	0.21	-1.80
233.8687	-50.6594	NGC 5946		2.194	17.80	17.16	-5.61	0.41	-1.38	0.43	327.58	4.19	119.5	12.3	0.55	-1.38

Таблица 1. (Продолжение)

RA2000	Dec2000	Название	Альтернативное название	R_{tidal} , arcmin	V (НВ)	DM	μ_{mra} , mas yr $^{-1}$	e_{pmra} , mas yr $^{-1}$	μ_{mde} , mas yr $^{-1}$	e_{pmde} , mas yr $^{-1}$	l , deg	b , deg	V_r , km s $^{-1}$	D_{hel} , kpc	E_{B-V}	[Fe/H]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
246.9183	-38.8489	NGC 6139		1.328	18.00	17.40	-8.04	0.29	-2.93	0.29	342.37	6.94	6.7	10.5	0.74	-1.65
251.7454	+47.5278	NGC 6229		8.833	18.00	17.37	-7.59	1.38	-1.82	1.25	73.64	40.31	-154.2	29.3	0.01	-1.44
295.4375	-34.0003	Terzan 8		13.031	18.03	17.46	-3.05	0.65	-2.10	0.65	5.76	-24.56	130.0	25.4	0.14	-1.87
283.7637	-30.4783	NGC 6715	M 54	6.325	18.17	17.56	-2.82	0.78	-2.47	0.34	5.61	-14.09	141.9	26.2	0.15	-1.59
254.8858	-37.1214	NGC 6256		9.487	18.20	17.45	0.12	0.50	-0.32	0.47	347.79	3.31	-99.5	9.3	0.84	-0.70
259.4967	-23.7658	NGC 6325		21.498	18.30	17.63	-7.60	0.26	-7.75	0.26	0.97	8.00	3.1	9.4	0.89	-1.17
271.2075	-7.5858	NGC 6539		21.058	18.33	17.58	-7.26	4.10	-6.96	2.96	20.80	6.78	-45.6	7.9	1.00	-0.66
272.6842	-7.2075	IC 1276	Pal 7	14.092	18.40	17.70	-6.46	0.54	-6.57	0.51	21.83	5.67	155.0	9.3	0.92	-0.56
225.9937	-33.0678	NGC 5824		4.151	18.45	17.88	-0.11	1.79	-4.37	1.92	332.55	22.07	-38.4	31.3	0.13	-1.85
219.9021	-26.5383	NGC 5694		9.487	18.50	17.93	-2.27	1.52	-2.44	1.29	331.06	30.36	-145.8	33.9	0.09	-1.86
267.2192	-20.3594	NGC 6440		5.914	18.70	17.90	-1.38	0.67	-1.64	0.63	7.73	3.80	-78.7	8.0	1.09	-0.34
247.1671	-35.3536	Terzan 3		6.313	18.80	18.10	-6.11	0.63	-3.44	0.71	345.08	9.19	-136.3	26.4	0.32	-0.73
264.0437	-38.5533	Ton 2	Pismis 26	3.964	19.10	18.33	-1.83	0.26	-3.82	0.26	350.80	-3.42	-184.4	7.9	1.24	-0.50
136.9908	-37.2214	Pyxis		10.436	19.25	18.58	0.20	0.41	2.70	0.35	261.32	7.00	34.3	38.5	0.21	-1.20
270.4546	-27.8258	Djorg 2	E 456-SC38	5.206	19.50	18.80	-3.26	0.29	-3.47	0.28	2.76	-2.51	-150.0	13.8	1.00	-0.50
286.3137	+1.9008	NGC 6749		8.309	19.70	19.09	-4.55	0.39	-6.08	0.35	36.20	-2.20	-61.7	7.7	1.50	-1.60
265.9258	-26.2225	Pal 6		3.080	19.70	18.87	-7.72	0.46	-6.96	0.47	2.09	1.78	201.0	6.7	1.53	-0.10
261.7854	-7.0931	IC 1257		12.649	19.80	19.20	-3.54	0.64	-1.69	0.63	16.53	15.14	140.2	24.5	0.73	-1.70
263.9492	-30.4697	Terzan 1	HP 2	4.817	19.95	19.15	1.44	0.75	-3.47	0.41	357.57	1.00	35.0	6.5	1.64	-0.35
261.8892	-30.8022	Terzan 2	HP 3	3.147	20.10	19.29	-3.38	0.28	-3.63	0.29	356.32	2.30	109.0	9.5	1.42	-0.25
266.8679	-33.0656	Djorg 1		2.038	20.80	20.10	-7.97	0.63	-3.73	0.60	356.67	-2.48	-362.4	9.2	1.70	-0.40
071.5246	+31.3808	Pal 2		9.892	21.65	20.99	7.19	0.62	0.27	0.63	170.53	-9.07	-133.0	26.9	1.24	-1.30
268.6133	-24.1453	UKS 1		11.972	24.14	23.47	-2.78	0.51	-0.55	0.54	5.12	0.76	57.0	7.5	2.93	-1.20

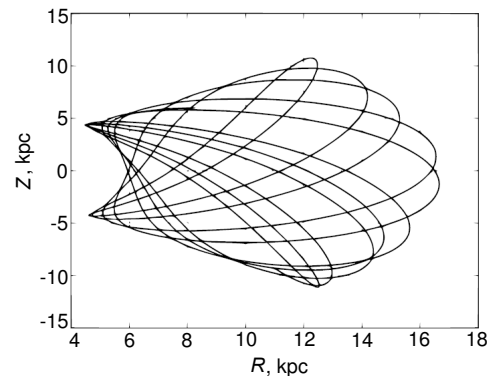
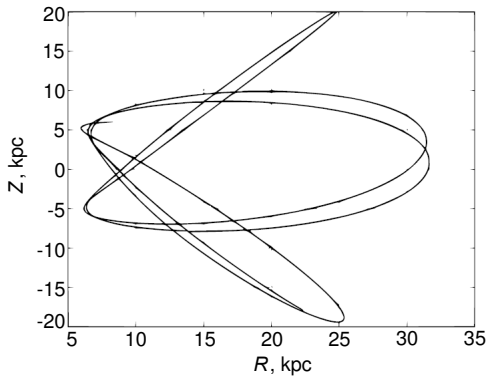
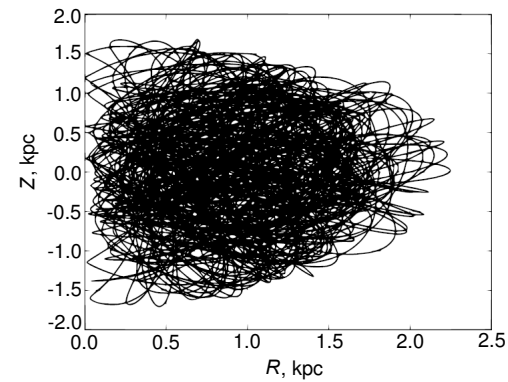
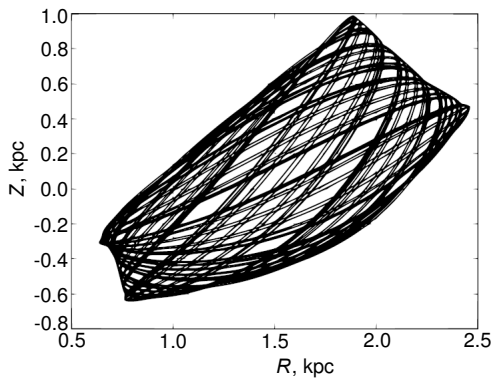
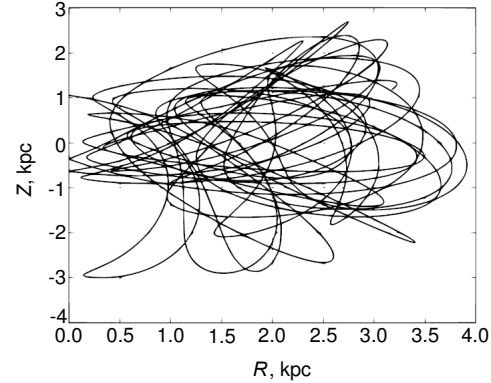
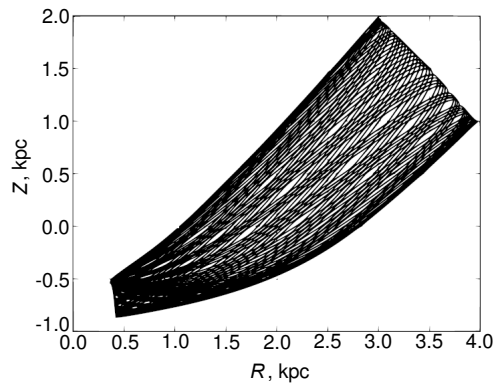
NGC 4590 ($[Fe/H] = -2.06$)NGC 6266 ($[Fe/H] = -1.29$)NGC 6316 ($[Fe/H] = -0.55$)

Рис. 9. Меридиональные сечения орбит шаровых скоплений NGC 4590, NGC 6266 и NGC 6316), вычисленных в рамках модели с осесимметричным потенциалом (слева) и потенциала с баром (справа). Хорошо заметна вызванная баром хаотизация в случае орбит скоплений NGC 6266 и NGC 6316.

Таблица 2. Результат анализа орбит скоплений в модели потенциала без бара

Скопление	R_{\min}^{\min}	$\langle R_{\min} \rangle$	R_{\max}^{\max}	$\langle R_{\max} \rangle$	$ z _{\max}^{\max}$	$\langle z _{\max} \rangle$	$\langle e \rangle$	E	h
1636-283	0.04	0.05	3.10	2.43	2.11	0.88	0.96	-18.89	0.22
IC 1257	7.15	8.57	86.05	67.22	70.86	44.74	0.77	-3.56	26.19
IC 4499	4.28	7.62	61.37	35.20	58.84	33.44	0.64	-4.53	13.18

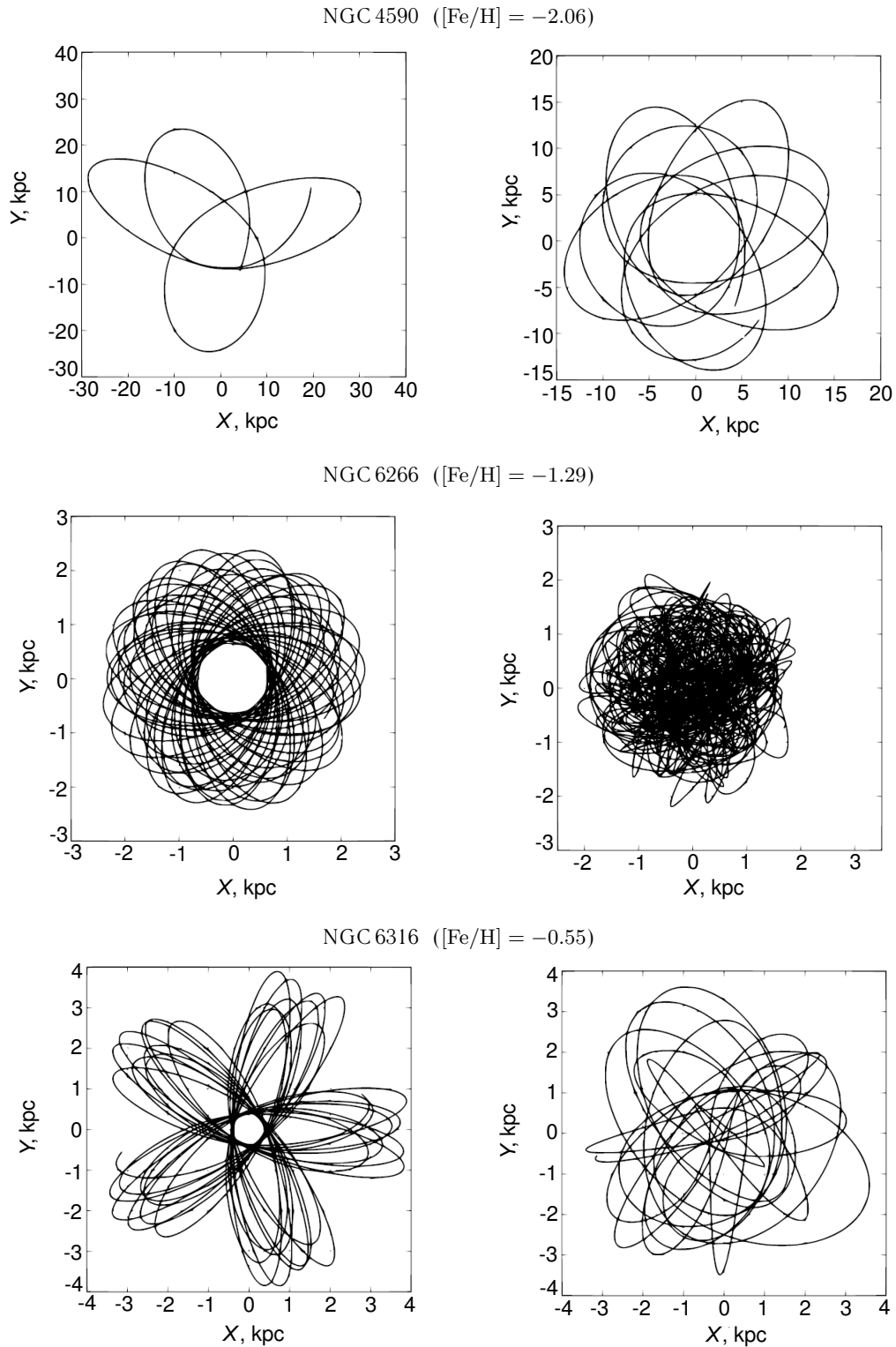


Рис. 10. Проекция орбит шаровых скоплений NGC 4590, NGC 6266 и NGC 6316, вычисленных в рамках модели с осесимметричным потенциалом (слева) и потенциала с баром (справа), на Галактическую плоскость. Хорошо заметна вызванная баром хаотизация в случае орбит скоплений NGC 6266 и NGC 6316.

Таблица 3. Результат анализа орбит скоплений в модели потенциала с баром

Скопление	R_{\min}^{\min}	$\langle R_{\min} \rangle$	R_{\max}^{\max}	$\langle R_{\max} \rangle$	$ z _{\max}^{\max}$	$\langle z _{\max} \rangle$	$\langle e \rangle$	E_{\min}	E_{\max}	E_{avg}	h_{\min}	h_{\max}	h_{avg}
NGC 1261	0.03	0.54	22.65	15.83	9.81	3.26	0.93	-15.83	-9.34	-12.77	-1.58	11.11	4.40
NGC 1851	0.07	0.23	21.68	15.98	23.19	8.55	0.97	-11.72	-6.82	-10.11	-4.40	5.19	-1.25
NGC 1904	0.10	0.28	31.66	16.15	19.93	6.90	0.97	-14.36	-8.19	-11.34	-6.62	5.44	-0.71

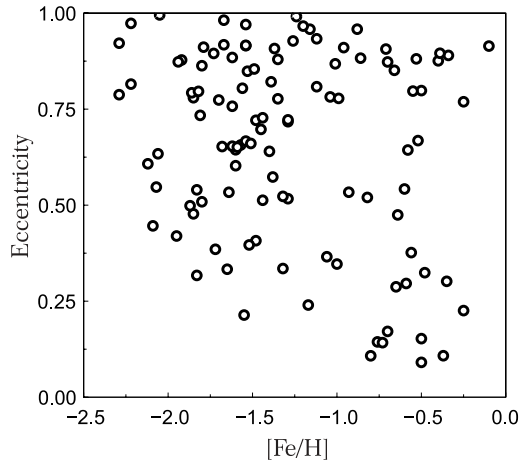


Рис. 11. Зависимость среднего эксцентриситета от металличности для орбит, вычисленных в рамках модели с осесимметричным потенциалом.

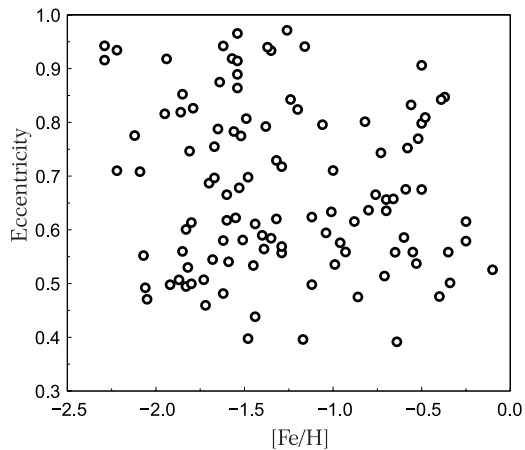


Рис. 12. Зависимость среднего эксцентриситета от металличности для орбит, вычисленных в рамках модели с баром.

3.3. Орбиты

Нами были рассчитаны орбиты 115 шаровых звездных скоплений Галактики. Расчеты проводились в двух моделях галактического гравитационного потенциала: одна модель содержала только осесимметричную составляющую (диск, сфероид, гало), а другая помимо этих трех компонент

включала также бар. Из 115 скоплений 5 оказались улетающими из Галактики, а именно Terzan 3, NGC 5634, Rup 106, Puxis и Pal 2. Это связано, вероятно, с большими ошибками их собственных движений, приведших к тому, что их полная пространственная скорость оказалась больше скорости убегания (все эти скопления расположены на достаточно большом удалении от Солнца, от 20.6 до 38.5 кпк, что и является источником больших ошибок собственных движений). Все вычисления проводились на 2 млрд. лет вперед, кроме скоплений IC 1257, NGC 6101, NGC 6229 и NGC 6715. Эти скопления достаточно далеки и, чтобы они успевали сделать более одного оборота, их орбиты интегрировались на 5 млрд. лет вперед. Пример результатов анализа полученных орбит шаровых скоплений приведены в таблицах 2 (для модели потенциала без бара) и 3 (для модели потенциала с баром). Таблицы 2 и 3 доступны в полном виде по адресу www.sai.msu.ru/groups/cluster/cl/orbits_gc1/. В таблице 2 приведены: название скопления, R_{\min}^{\min} — минимальное перицентрийное расстояние, $\langle R_{\min} \rangle$ — среднее перицентрийное расстояние, R_{\max}^{\max} — максимальное апоцентрийное расстояние, $\langle R_{\max} \rangle$ — среднее апоцентрийное расстояние, $|z|_{\max}^{\max}$ — наибольшее удаление от плоскости симметрии Галактики за все время, $\langle |z|_{\max} \rangle$ — среднее максимальное удаление от плоскости симметрии Галактики, $\langle e \rangle$ — оценка среднего эксцентриситета орбиты скопления, E — полная механическая энергия на единицу массы шарового скопления, выраженная в 100 км с^{-2} , h — проекция удельного углового момента скопления на ось симметрии Галактики (в $100 \text{ кпк км с}^{-1}$). Все расстояния приведены в кпк. В случае осесимметричной модели потенциала величины E и h сохраняются. Таблица 3 отличается от таблицы 2 тем, что вместо величин E и h в ней приведены минимальные, максимальные и средние значения соответствующих величин (E_{\min} , E_{\max} , E_{avg} , h_{\min} , h_{\max} , h_{avg}) в связи с тем, что закон сохранения полной механической энергии и закон сохранения проекции орбитального момента на ось симметрии Галактики не выполняются в случае потенциала с баром (бар вносит в гамильтониан скопления явную зависимость от угла и времени). Полная

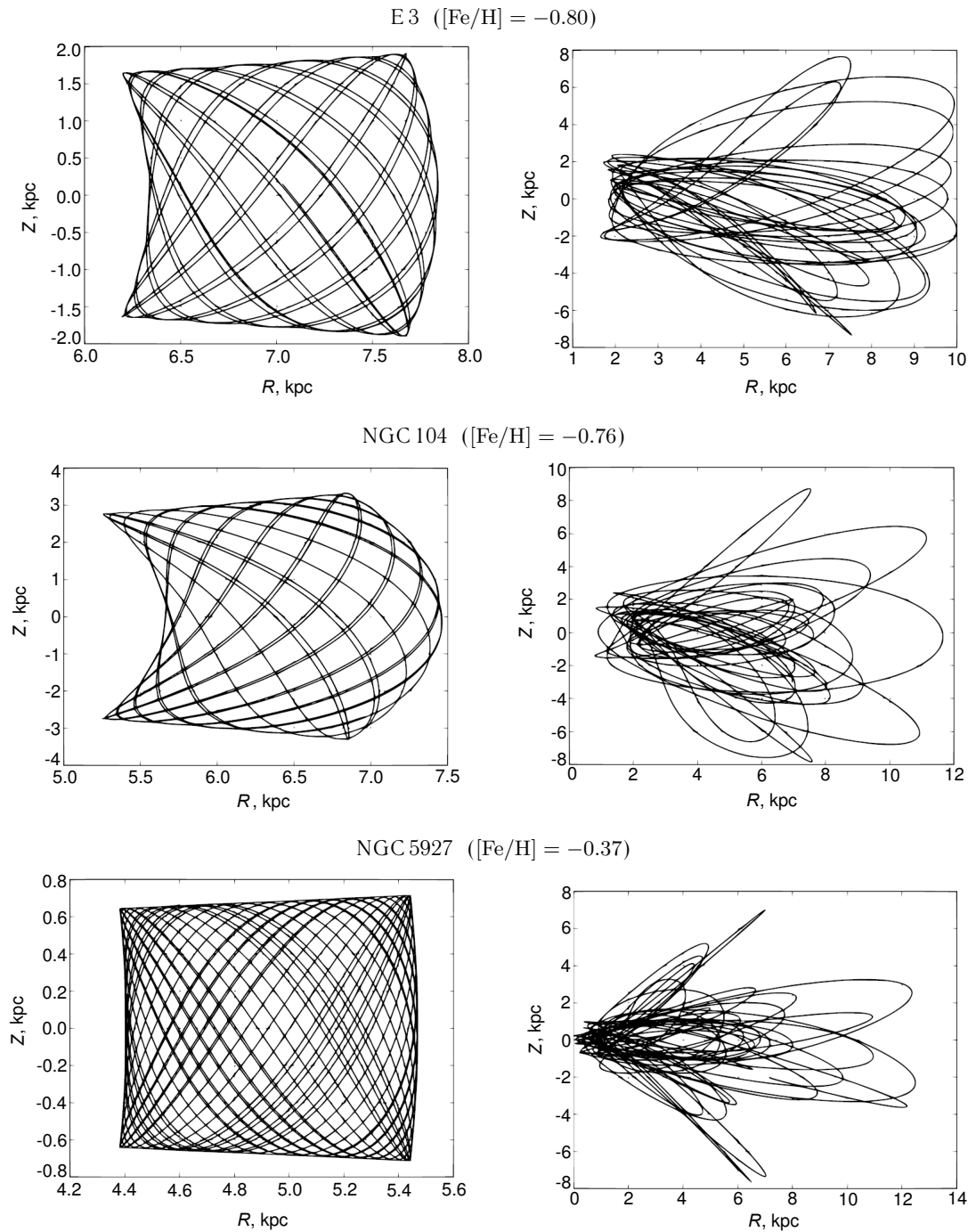


Рис. 13. Меридиональные сечения орбит шаровых скоплений E3, NGC 104 и NGC 5927, вычисленных в рамках модели с осесимметричным потенциалом (слева) и потенциала с баром (справа).

механическая энергия скоплений вычислялась с учетом нормировки гравитационного потенциала на ноль на расстоянии 300 кпк (условная граница Галактики). На рис. 9 и 10 показаны меридиональные сечения и проекции орбит на Галактическую плоскость для трёх шаровых скоплений (малометаллических NGC 4590, NGC 6266 и богатого металлами NGC 6316), вычисленных в рамках

модели с осесимметричным потенциалом (слева) и модели потенциала с баром (справа). Интересно, что корреляция между металличностью и средним эксцентриситетом, которая хорошо заметна в случае орбит, вычисленных в модели с осесимметричным потенциалом — орбиты почти всех наиболее малометаллических скоплений имеют большие эксцентриситеты (рис. 11) — исчезает при переходе к потенциалу с баром (рис. 12).

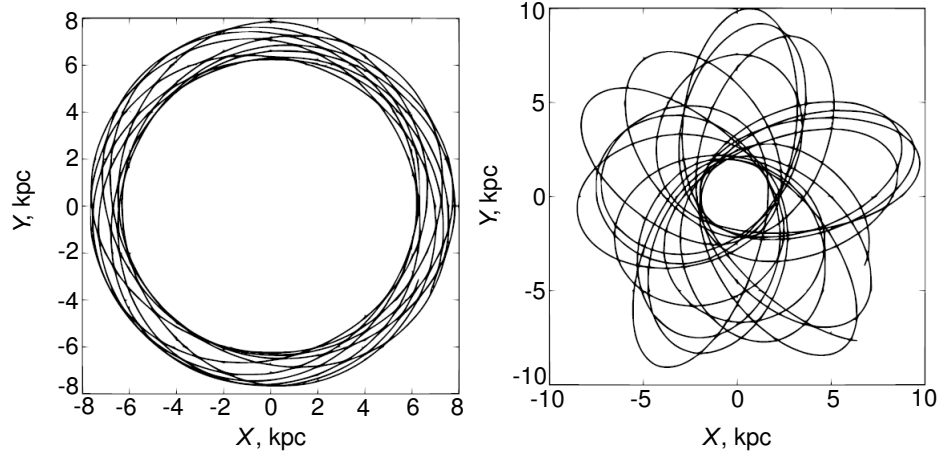
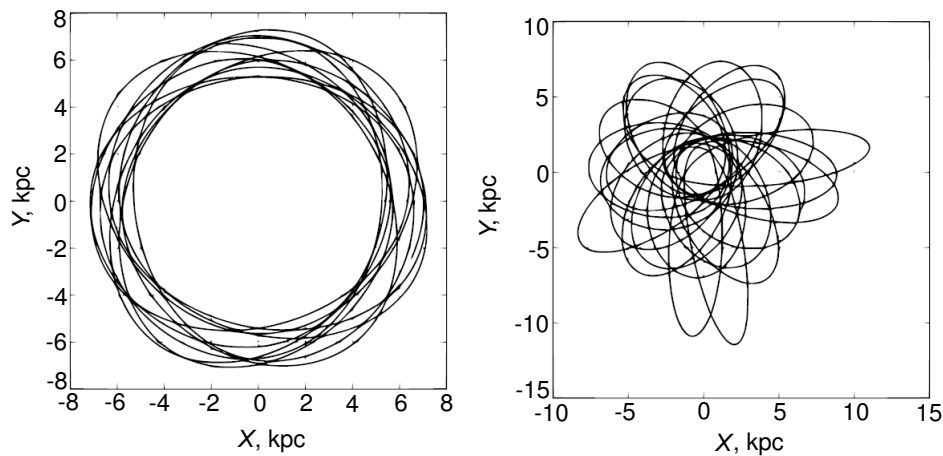
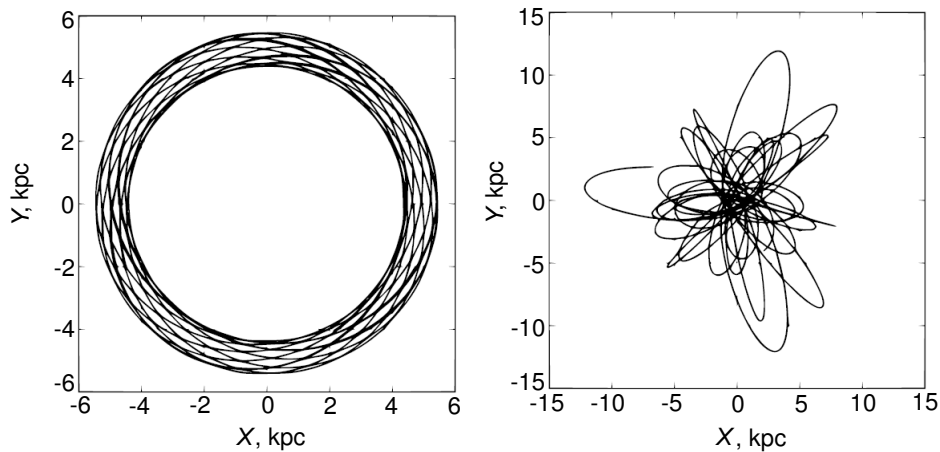
E3 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.80$)NGC 104 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.76$)NGC 5927 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.37$)

Рис. 14. Проекции орбит шаровых скоплений E3, NGC 104 и NGC 5927, вычисленных в рамках модели с осесимметричным потенциалом (слева) и потенциала с баром (справа).

В отличие от выводов, полученных на данный момент в самом полном опирающемся на наблюдательные данные исследовании орбит шаровых скоплений нашей Галактики (54 скопления) [39, 40], согласно нашим результатам, бар оказывает существенное влияние на орбиты всех

скоплений, приводя к разрушению орбитальных ящиков и хаотизации орбит. Влияние бара на удаленные от Галактического центра орбиты слабее (запутываются в основном центральные части этих орбит), как и ожидалось, учитывая 10-процентный вклад бара в эффективную массу Галактики. Орби-

ты некоторых скоплений толстого диска под действием бара оказываются буквально «вытянуты» и, в среднем, ближе к Галактическому центру — типичными примерами могут служить скопления E3, NGC 104 и NGC 5927, чьи орбиты показаны на рис. 13 и 14. Более подробный анализ орбит скоплений будет выполнен в следующей статье.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе вычислены абсолютные собственные движения (с характерной точностью около 0.4 миллисекунд дуги в год, что соответствует средней ошибке компонент поперечной скорости 17 км с^{-1}) и построены Галактические орбиты для самой большой на данный момент выборки Галактических шаровых скоплений (115 объектов). Это более, чем в два раза больше числа объектов в самой большой из выборок шаровых скоплений, для которых ранее исследованы Галактические орбиты. Орбиты вычислены в рамках двух моделей Галактического потенциала — осесимметричной модели и модели с вращающимся баром. В отличие от результатов, ранее полученных другими авторами, нами установлено существенное влияние бара практически на все скопления, которое проявляется в рандомизации орбит и, в особенности, частей орбит, расположенных вблизи Галактического центра, и растягивании орбит некоторых скоплений толстого диска.

БЛАГОДАРНОСТИ

В данной работе использовались 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*, а также 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 Анжелес) и Лаборатории реактивного движения при поддержке НАСА. Данная работа осуществлялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект номер 18-02-00890).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. E. Harris, *VizieR On-Line Cat. VII/195* (2010).
2. D. I. Casetti-Dinescu, T. M. Girard, L. Jilkova, et al. *Astron. J.* **146**, 33 (2013).
3. D. I. Casetti-Dinescu, T. M. Girard, V. I. Korchagin, et al. *Astron. J.* **140**, 1282 (2010).
4. D. I. Casetti-Dinescu, T. M. Girard, D. Herrera, et al. *Astron. J.* **124**, 195(2007).
5. A. K. Dambis, *Astron. Astrophys. Trans.* **25**, 185 (2006).
6. D. I. Dinescu, T. M. Girard, W. F. van Altena, et al., *Astron. J.* **125**, 1373 (2003).
7. D. I. Dinescu, T. M. Girard, W. F. van Altena, et al., *Astron. J.* **117**, 1792 (1999).
8. D. I. Dinescu, W. F. van Altena, T. M. Girard, et al., *Astron. J.* **117**, 277 (1999).
9. D. I. Dinescu, T.M. Girard, W. F. van Altena, et al. *Astron. J.* **114**, 1014 (1997).
10. M.-R. L. Cioni, K. Bekki, L. Girardi, et al. *Astron. and Astrophys.* **586**, 77 (2016).
11. S. Feltzing and R.A. Johnson, *Astron. and Astrophys.* **385**, 67 (2002).
12. T. K. Fritz and N. Kallivayalil, *Astrophys. J.* **811**, 123 (2015).
13. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Roeser, et al., *Astron. and Astrophys.* **558**, 53 (2013).
14. A. H. W. Küpper, E. Balbinot, A. Bonaca, et al., *Astrophys. J.* **803**, 80 (2015).
15. S. R. Majewski and K. M. Cudworth *Publ. Astron. Soc. Pacific* **105**, 987 (1993).
16. D. Massari, A. Bellini, F. R. Ferraro, et al., *Astrophys. J.* **779**, 81 (2013).
17. L. J. Rossi, S. Ortolani, B. Barbuy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450**, 3270 (2015).
18. J.-J. Wang, L. Chen, and D. Chen, *Astron. and Astrophys.* , **29**, 386 (2005).
19. L. L. Watkins and R. P. van der Marel, *Astrophys. J.* **839**, 89 (2017).
20. M. Zoccali, A. Renzini, S. Ortolani, et al. *Astron. J.* **121**, 2638 (2001).
21. N. Zacharias, C. Finch, and J. Flouard, *Astron. J.* **153**, 166 (2017).
22. D. Michalik, L. Lindegren, and D. Hobbs, *Astron. and Astrophys.* **574**, 115 (2015).
23. D. G. Monet, S. E. Levine, B. Canzian, et al., *Astron. J.* **125**, 984 (2003).
24. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
25. N. Zacharias, C. Finch, J. Subasavage, et al., *Astron. J.* **150**, 101 (2015).
26. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
27. A. Mainzer, T. Grav, J. Bauer, et al., *Astrophys. J.* **743**, 156 (2011).
28. *Gaia Collab.*, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al. *Astron. and Astrophys.* **595**, 1 (2016).
29. A. D. Klinichev, E. V. Glushkova, A. K. Dambis, and L. N. Yalyalieva, *Astronomy Reports* , 2018 (in press).
30. M. B. Taylor, *ASP Conf. Ser.* **351**, 666 (2006).
31. A. K. Dambis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **396**, 553 (2009).

32. R. de la Fuente Marcos, C. de la Fuente Marcos, C. Moni Bidin, et al., *Astron. and Astrophys.* **581**, A13 (2015).
33. A. Koch, C. J. Hansen, and A. Kunder, *Astron. and Astrophys.* **604**, A41 (2017).
34. B. Dias, B. Barbuy, I. Saviane, et al., *Astron. and Astrophys.* **590**, A9 (2016).
35. M. Miyamoto and R. Nagai, *PASJ*, **27**, no. 4, 533, (1975).
36. L. Hernquist, *Astron. J.*, **356**, 359, (1990).
37. A. S. Rastorguev, N. D. Utkin, M. V. Zabolotskikh, et al. *Astrophysical Bulletin* **72**, 122 (2017).
38. G. de Vaucouleurs and K. C. Freeman, *Vistas Astron.*, **14**, 163 (1972).
39. Ch. Allen, E. Moreno, B. Picardo, *Astrophys. J.* **652**, 1150 (2006).
40. Ch. Allen, E. Moreno, B. Picardo, *Astrophys. J.* **674**, 237 (2008).

Globular Clusters: Absolute Proper Motions and Galactic Orbits

A. A. Chemel, E. V. Glushkova, A. K. Dambis, A. S. Rastorguev, L. N. Yalyalieva, and A. D. Klinichev

We cross-match objects from several different astronomical catalogs to determine the absolute proper motions of stars within the 30-arcmin radius fields of 115 Milky-Way globular clusters with the accuracy of $1\text{--}2 \text{ mas yr}^{-1}$. The proper motions are based on positional data recovered from the USNO-B1, 2MASS, URAT1, ALLWISE, UCAC5, and Gaia DR1 surveys with up to ten positions spanning an epoch difference of up to about 65 years, and reduced to Gaia DR1 TGAS frame using UCAC5 as the reference catalog. Cluster members are photometrically identified by selecting horizontal- and red-giant branch stars on color-magnitude diagrams, and the mean absolute proper motions of the clusters with a typical formal error of about 0.4 mas yr^{-1} are computed by averaging the proper motions of selected members. The inferred absolute proper motions of clusters are combined with available radial-velocity data and heliocentric distance estimates to compute the cluster orbits in terms of the Galactic potential models based on Miyamoto and Nagai disk, Hernquist spheroid, and modified isothermal dark-matter halo (axisymmetric model without a bar) and the same model + rotating Ferre's bar (non-axisymmetric). Five distant clusters have higher-than-escape velocities, most likely due to large errors of computed transversal velocities, whereas the computed orbits of all other clusters remain bound to the Galaxy. Unlike previously published results, we find the bar to affect substantially the orbits of most of the clusters, even those at large Galactocentric distances, bringing appreciable chaotization, especially in the portions of the orbits close to the Galactic center, and stretching out the orbits of some of the thick-disk clusters.

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