



О связи между сечениями Пуанкаре и спектральными характеристиками орбит шаровых скоплений в центральной области Галактики

А.Т. Байкова¹, А.А. Смирнов¹, В.В. Бобылев¹

¹ ГАО РАН

Поступила в редакцию 28 мая 2025 / Принята к публикации 17 июня 2025

Аннотация

Продолжены исследования авторов (см. 233, 235 и 236 выпуски Известий Главной астрономической обсерватории в Пулкове) орбитальной динамики – регулярной или хаотической – шаровых скоплений (ШС) в центральной области Галактики, подверженной наибольшему влиянию вращающегося бара. Данная работа посвящена рассмотрению таких методов определения хаотичности как сечения Пуанкаре и спектральные методы. Результатом работы является оценка связи между сечениями Пуанкаре и спектральными характеристиками орбит. Как и прежде, выборка включает 45 шаровых скоплений в центральной области Галактики радиусом 3.5 кпк. Для формирования 6D фазового пространства, требуемого для интегрирования орбит, использованы самые точные на сегодняшний день астрометрические данные со спутника Gaia (Vasiliev, Baumgardt, 2021), а также новые уточненные средние расстояния (Baumgardt, Vasiliev, 2021). Приняты следующие, наиболее реалистичные параметры бара: масса $10^{10} M_{\odot}$, длина большой полуоси модели бара в виде трехлопастного эллипсоида 5 кпк, угол поворота оси бара 25° , скорость вращения 40 км/с/кпк. Результатом работы является то, что установлена стопроцентная корреляция между классификацией по сечениям Пуанкаре и спектральными характеристиками орбит. В итоге классификация по сечениям Пуанкаре может быть заменена более наглядным анализом амплитудных спектров орбит. В результате составлены 2 списка ШС: с регулярной и хаотической динамикой. Отдельно выделены ШС с различной степенью хаотизации орбит.

ключевые слова: Галактика, бар, шаровые скопления, хаотическая и регулярная орбитальная динамика

Введение

Данная работа по-существу является продолжением работ Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024b; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025, посвященных исследованию орбитальной динамики – регулярной или хаотической – шаровых скоплений в центральной области Галактики. Как и в прежних работах, выборка включает 45 шаровых скоплений в центральной области Галактики радиусом 3.5 кпк. Для формирования 6D фазового пространства, требуемого для интегрирования орбит, использованы самые точные на сегодняшний день астрометрические данные со спутника Gaia (Eugene Vasiliev и Holger Baumgardt, 2021), а также новые уточненные средние расстояния (H. Baumgardt и E. Vasiliev, 2021). Приняты следующие параметры бара, известные из литературы (Palous, Jungwiert и Kopecky, 1993; Sanders и др., 2019): масса $10^{10} M_{\odot}$, длина большой полуоси 5 кпк, угол поворота оси бара 25° , скорость вращения 40 км/с/кпк.

Поскольку ШС в центральной области Галактики подвержены наибольшему воздействию со стороны вытянутого вращающегося бара, то вопрос о характере орбитального движения ШС –

*e-mail:bajkova@gaoran.ru

регулярного или хаотического – представляет большой интерес. Так, например, в работе Machado и Manos, 2016 показано, что основная доля хаотических орбит должна быть именно в области бара.

Целью данной работы является установление связи между сечениями Пуанкаре и спектральными характеристиками орбит как функций времени. К спектральным методам относится, в частности, частотный метод, используемый в работах Nieuwmunster и др., 2024; Valluri и др., 2010. Авторы этих работ показали, что можно измерить стохастичность орбиты на основе сдвига фундаментальных частот, определенных в течение двух последовательных интервалов времени. Другим методом этого класса является недавно предложенный нами метод (Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025), основанный на вычислении спектра мощности орбиты как функции времени и вычислении энтропии спектра мощности как меры хаотичности орбит.

В настоящей работе мы ограничиваемся рассмотрением задачи выявления ШС с хаотической динамикой на примере гравитационного потенциала, традиционно используемого нами для анализа орбитального движения ШС (Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024b; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025). Наиболее подробное описание модели гравитационного потенциала Галактики, включающей в себя трехкомпонентную осесимметричную часть (балдж, диск, гало) и встроенный центральный вытянутый бар, а также астрометрических данных с космического аппарата Gaia (Eugene Vasiliev и Holger Baumgardt, 2021; H. Baumgardt и E. Vasiliev, 2021), необходимых для формирования 6D-фазового пространства для интегрирования орбит, дается в уже упомянутой работе Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024b. Там же говорится о принципе отбора 45 шаровых скоплений. В работах Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024b; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025 даются также все необходимые литературные ссылки. Поэтому в данной работе мы опускаем технические детали, связанные с описанием гравитационного потенциала как осесимметричного, так и неосесимметричного, данных, а также отбора шаровых скоплений. Здесь рассматриваются лишь методические вопросы, связанные с анализом регулярности/хаотичности орбитального движения ШС, основанного на названных выше методах, которому посвящен раздел 1. В разделе 2 производится сравнение полученных результатов классификации ШС и установление связи между сечениями Пуанкаре и спектральными характеристиками орбит. В разделе Выводы сформулированы основные результаты работы.

1 Методы

Напомним основные положения рассмотренных методов определения характера орбитальной динамики: хаотического или регулярного. Более подробное описание дано в работах Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024b; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025.

1.1 Сечения Пуанкаре

Алгоритм, использованный для построения отображений, заключается в следующем (Murray и Dermott, 1999):

1. Рассматриваем фазовое пространство (X, Y, V_x, V_y) .
2. Исключаем V_y используя закон сохранения обобщенного интеграла энергии (интеграла Якоби) и переходим в пространство (X, Y, V_x) .
3. Определяем плоскость $Y = 0$, точки пересечения с орбитой обозначим на плоскости (X, V_x) . Берем только те точки, в которых $V_y > 0$.

Если точки пересечения плоскости складываются в непрерывную гладкую линию (или несколько разделенных линий), то движение считается регулярным. В случае хаотического движения вместо того, чтобы располагаться на гладкой кривой, точки заполняют двумерную область фазового пространства, причем иногда возникает эффект прилипания точек к границам островов, соответствующих упорядоченному движению (Morbidelli, 2002).

В данной работе мы приводим сечения Пуанкаре, полученные в работе Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a.

1.2 Частотный метод

Метод заключается в том, что измерение хаотичности орбиты производится на основе сдвига фундаментальных частот, определенных в течение двух последовательных интервалов времени. Для каждой частотной компоненты f_i вычисляется параметр, который называется дрейфом частоты:

$$\lg(\Delta f_i) = \lg \left| \frac{\Omega_i(t_1) - \Omega_i(t_2)}{\Omega_i(t_1)} \right|, \quad (1)$$

где i определяет частотную составляющую в декартовых координатах (т.е. $\lg(\Delta f_x)$, $\lg(\Delta f_y)$ и $\lg(\Delta f_z)$). Затем наибольшее значение этих трех параметров дрейфа частоты $\lg(\Delta f_x)$ приписывается параметру дрейфа частоты $\lg(\Delta f)$. Чем выше значение $\lg(\Delta f)$, тем хаотичнее орбита. С целью достижения высокой точности мы брали время интегрирования 120 млрд лет, почти на порядок превышающее возраст Вселенной. В данной работе мы также использовали результаты классификации, приведенные в работе Vajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a.

1.3 Спектральный анализ орбит

Спектральный анализ орбит, предложенный нами в работе Vajkova, Smirnov и Bobylev, 2025, основывается на вычислении модуля дискретного преобразования Фурье (ДПФ) равномерного временного ряда радиальных расстояний точек орбит от центра Галактики r_n , вычисленного по их X, Y, Z галактическим координатам $X(t_n), Y(t_n), Z(t_n)$ как функций времени: $r(t_n) = \sqrt{X(t_n)^2 + Y(t_n)^2 + Z(t_n)^2}$, где $n = 0, \dots, N - 1$ (N - длина ряда).

Так, формула для модуля ДПФ (амплитудного спектра) последовательности r_n будет выглядеть следующим образом:

$$\bar{r}_k = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} r(t_n) \exp\left(-j \frac{2\pi \times n \times k}{N}\right) \right|, \quad k = 0, \dots, N - 1. \quad (2)$$

При этом длина ряда выбирается равной $N = 2\alpha$, где α целое > 0 , чтобы можно было применить для вычисления ДПФ алгоритм быстрого преобразования Фурье. Нужная длина ряда достигается путем дополнения реального ряда нулями. В нашем случае длина реальных последовательностей равна 120000, поскольку мы интегрируем орбиты на 120 млрд лет назад с интервалом интегрирования 1 млн лет. Перед вычислением ДПФ мы предварительно центрируем ряды координат (т.е. избавляемся от постоянной составляющей), затем дополняем полученную последовательность r_n нулевыми отсчетами при $n > 120000$ до достижения длины всей анализируемой последовательности $N = 262144 = 2^{18}$. Отметим, что дополнение исходной последовательности нулями полезно также с точки зрения увеличения точности координат спектральных составляющих. Поскольку интервал между отсчетами последовательностей во времени равен $\delta t = 0.001$ млрд лет, то анализируемый частотный диапазон, который является периодической функцией, составляет $F = 1/\Delta t = 1000$ Гуг⁻¹. Дискрет по частоте составляет $\Delta_F = F/N \approx 0.03815$ Гуг⁻¹. В дальнейшем для удобства мы на графиках будем указывать не физические частоты, а номера отсчетов k (или K) дискретного преобразования Фурье (2). Переход от k к физической частоте может быть произведен по формуле $f = k \times \Delta_F \approx k \times 0.003815$. Далее полученный спектр мощности орбиты ШС нормируется таким образом, чтобы максимальное значение было равно единице.

Решение о характере орбитальной динамики ШС определяется путем вычисления энтропии Шеннона нормализованного амплитудного спектра \bar{r}_k как меры хаотичности (Чумак, 2011):

$$E_r = -\frac{1}{M} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{r}_k \ln(\bar{r}_k), \quad (3)$$

где M - масштабный коэффициент, который вводится для удобства представления численных результатов.

Очевидно, чем больше значение энтропии, тем выше степень хаотичности орбиты.

При этом мы анализируем как опорные орбиты, так и теньевые, полученные при вомущении начальной фазовой точки как принято в работах Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024b; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025 следующим образом: $X_1 = X_0 + X_0 \times 0.00001$, $Y_1 = Y_0 + Y_0 \times 0.00001$, $Z_1 = Z_0 + Z_0 \times 0.00001$.

1.4 Спектральный анализ X и V_x - координат орбит

В этой работе с целью установления связи между сечениями Пуанкаре на плоскости (X, V_x) и спектральными характеристиками орбит мы предлагаем вычислять модуль дискретного преобразования Фурье равномерных временных рядов координат $X(t_n)$ и $V_x(t_n)$:

$$\bar{X}_k = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(t_n) \exp\left(-j \frac{2\pi \times n \times k}{N}\right) \right|, \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (4)$$

$$\bar{V}_{xk} = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V_x(t_n) \exp\left(-j \frac{2\pi \times n \times k}{N}\right) \right|, \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (5)$$

На рис. 1 в качестве примера приводятся полученные амплитудные спектры для двух ШС: NGC 6266 и NGC 6355 с регулярной и хаотической динамикой соответственно. Как видно из рисунка и как показывает анализ спектров ШС всей выборки, спектры X - и V_x - координат схожи. Поэтому ниже с целью экономии места мы приводим только спектры X - координат.

Так же, как и в случае спектрального метода, предложенного в работе Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025, регулярным орбитам соответствуют линейчатые узкие спектры, а хаотическим – широкие спектры. Это следует, как будет показано в следующем разделе, из сравнения сечений Пуанкаре и с результатами спектрального анализа, что является целью данной работы.

2 Результаты

Графическое представление результатов спектрального анализа в сравнении с результатами, полученными ранее Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024b; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025 (сечения Пуанкаре, частотный метод, визуальный анализ), для всей выборки из 45 ШС дается на рис. 2, а результаты классификации орбит на регулярные (R) и хаотические (C) – в таблице 1 (в первой колонке приводится порядковый номер ШС, а во второй – наименование ШС).

Предложенный метод был применен как для опорных орбит, так и для теньевых орбит. Интегрирование орбит было произведено, как уже было отмечено выше, на 120 млрд лет назад.

На рис. 2 слева направо изображены: $X - Y$ проекции орбит; радиальные значения исходных (опорных) и возмущенных (теньевых) орбит в зависимости от времени (желтым цветом показаны опорные орбиты, фиолетовым – теньевые); сечения Пуанкаре $X - V_x$; X - координаты сечений Пуанкаре; V_x - координаты сечений Пуанкаре; нормализованные спектры мощности X - значений опорных и теньевых орбит как функций времени, показанные черным и красным цветом соответственно; иллюстрация к частотному методу (красным цветом показан спектр мощности первой половины временной последовательности, черным – второй половины). Наименования ШС указаны на вторых панелях слева.

Наиболее наглядной иллюстрацией расхождения между опорными и теньевыми фазовыми точками являются левые колонки 1 и 2 рис. 2, где приведены опорные и теньевые орбиты для каждого ШС в том порядке (сверху вниз), как они указаны в таблице 2. В первой колонке приводятся $X - Y$ проекции орбит, построенные в системе вращающегося бара на интервале времени $[-11, -12]$ млрд лет. Во второй колонке приводятся радиальные значения орбиты $r(t)$ на интервале $[0, -12]$ млрд лет, сравнимом как с возрастом ШС, так и Вселенной. На этих графиках желтым цветом показаны опорные орбиты, фиолетовым – теньевые. Можно видеть, что у многих объектов на графиках

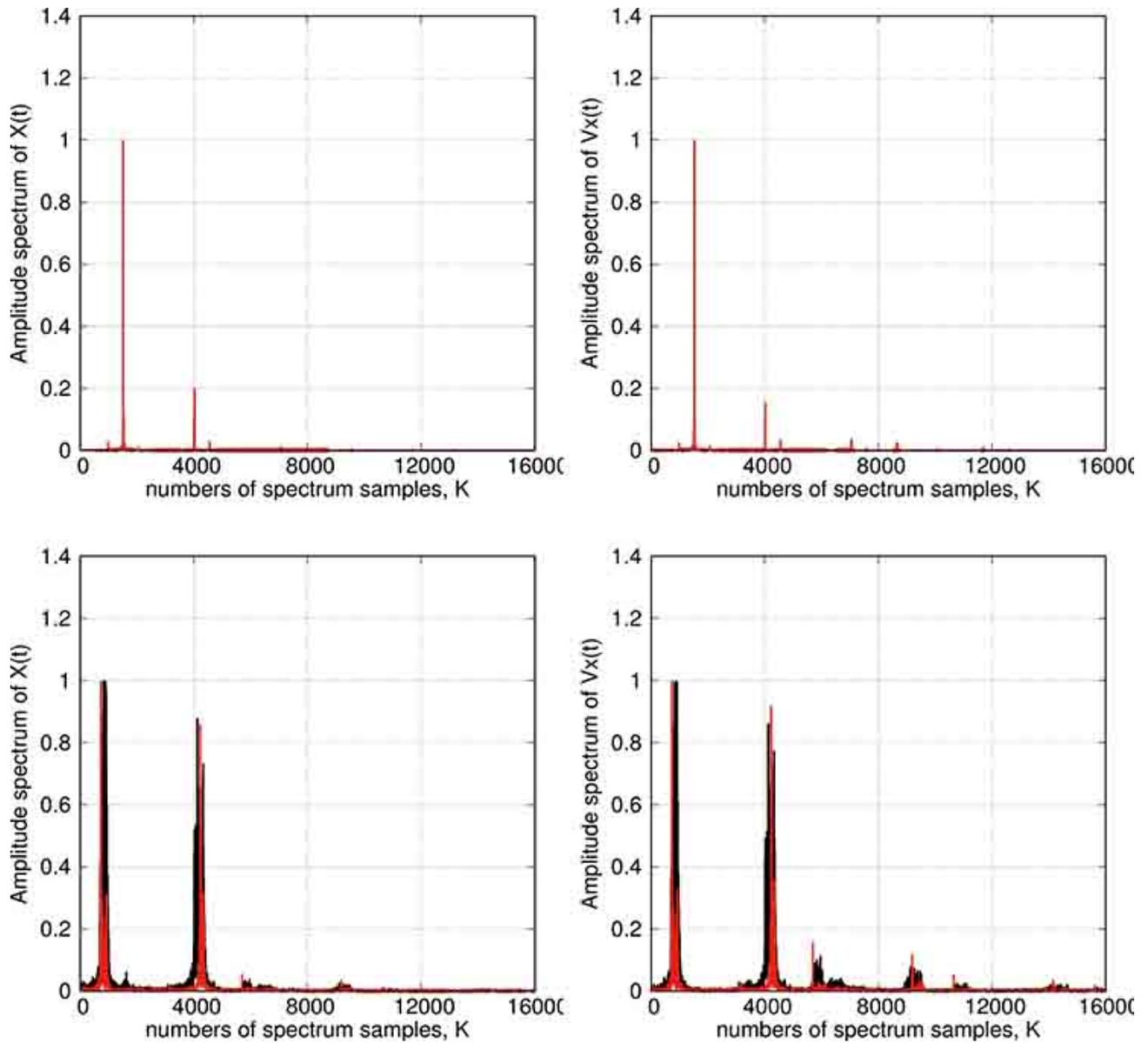


Рис. 1: Нормализованные спектры мощности X - координат (слева), V_x - координат (справа) опорных и теневого орбит как функций времени, показанные черным и красным цветом соответственно. Верхние панели относятся к ШС NGC 6266 с регулярной динамикой, нижние – к ШС NGC 6355 с хаотической динамикой.

присутствует только фиолетовый цвет. Это означает, что тeneвая орбита практически совпадает с опорной (желтые линии покрываются фиолетовыми). К таким объектам относятся ШС с регулярными орбитами. На графиках ШС с хаотическими орбитами видны как фиолетовые, так и желтые линии, что позволяет качественно судить о степени хаотичности орбит.

В третьей колонке приведены сечения Пуанкаре на плоскости (X, V_x) . Зависимость координат X и V_x от номера отсчета приведены в четвертой и пятой колонках соответственно. Регулярность распределения координат X и V_x характеризует регулярность орбитальной динамики и это отражается на сечениях Пуанкаре.

Нормализованные амплитудные спектры опорных и тeneвых орбит, приведенные в шестой и седьмой колонках, имеют характер линейчатых спектров у ШС с регулярной динамикой и широких спектров у ШС с хаотической динамикой так же, как и в случае спектрального метода, предложенного в Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025, и частотного метода.

Полученные амплитудные спектры координат X и V_x показывают стопроцентную корреляцию с характером распределения точек на сечениях Пуанкаре, что отражено в шестой и седьмой колонках таблицы 1, где приводятся также результаты классификации ШС с регулярными и хаотическими орбитами из прежних работ (Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a; Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025), полученные с использованием: спектрально-энтропийного метода (третья колонка таблицы, Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2025), частотного метода (четвертая колонка, Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a), визуального метода (пятая колонка, Bajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a). Анализ таблицы говорит о высокой корреляции между результатами классификации ШС различными методами (не ниже 82.5%). Вследствие установленной связи между сечениями Пуанкаре и спектральным методом для анализа орбитальной динамики вместо сечений Пуанкаре, вынесение решений по которым отличается некоторым субъективизмом, может быть использован более наглядный метод спектрального анализа.

Из того факта, что классификация по сечениям Пуанкаре совпадает полностью с классификацией по ширине амплитудного спектра, мы определили два списка. Первый список включает 25 шаровых скоплений с регулярной динамикой (R) (NGC6266, Terzan4, Liller1, NGC6380, Terzan1, Terzan5, NGC6440, Terzan6, Terzan9, NGC6522, NGC6528, NGC6624, NGC6637, NGC6717, NGC6723, Terzan3, Pismi26, NGC6569, E456-78, NGC6540, Djorg2, NGC6171, NGC6316, NGC6539, NGC6553) и второй список из 20 шаровых скоплений с хаотической динамикой (C) (NGC6144, E452-11, NGC6273, NGC6293, NGC6342, NGC6355, Terzan2, BH229, NGC6401, Pal6, NGC6453, NGC6558, NGC6626, NGC6638, NGC6642, NGC6256, NGC6304, NGC6325, NGC6388, NGC6652). Кроме того, из второго списка мы считаем целесообразным выделение ШС с различной степенью хаотичности. Так, к ШС со слабохаотической динамикой мы отнесли ШС NGC6144, NGC273, NGC6304, NGC6325, NGC6388. Сильную хаотичность демонстрируют ШС E452-11, NGC6355, Terzan2, BH229, NGC6401, Pal6, NGC6558, NGC6638, NGC6642, NGC6652.

Выводы

Получены следующие основные результаты:

1. Установлена прямая, стопроцентная связь между сечениями Пуанкаре регулярных и хаотических орбит со спектральными характеристиками орбит. Чем шире спектр, тем более хаотический характер орбиты показывает сечение Пуанкаре. Так что для анализа орбитальной динамики вместо сечений Пуанкаре, классификация по которым отличается субъективизмом, может быть использован более наглядный метод спектрального анализа орбит.

2. На основании установленной связи между сечениями Пуанкаре со спектральными характеристиками орбит из 45 ШС в центральной области Галактики радиусом 3.5 кпк определен список из 25 шаровых скоплений с регулярной динамикой (R):

NGC6266, Terzan4, Liller1, NGC6380, Terzan1, Terzan5, NGC6440, Terzan6, Terzan9, NGC6522, NGC6528, NGC6624, NGC6637, NGC6717, NGC6723, Terzan3, Pismi26, NGC6569, E456-78, NGC6540, Djorg2, NGC6171, NGC6316, NGC6539, NGC6553

и список из 20 шаровых скоплений с хаотической динамикой (С):

NGC6144, E452-11, NGC6273, NGC6293, NGC6342, NGC6355, Terzan2, BH229, NGC6401, Pal6, NGC6453, NGC6558, NGC6626, NGC6638, NGC6642, NGC6256, NGC6304, NGC6325, NGC6388, NGC6652.

3. Из списка ШС с хаотической динамикой можно выделить ШС с различной степенью хаотизации орбит. К слабохаотическим мы отнесли ШС NGC6144, NGC6273, NGC6304, NGC6325, NGC6388. Сильную хаотичность показывают ШС E452-11, NGC6355, Terzan2, BH229, NGC6401, Pal6, NGC6558, NGC6638, NGC6642, NGC6652.

Список литературы

- Bajkova, A. T., A. A. Smirnov и V. V. Bobylev (2024a). Analysis of regularity/chaoticity of the Globular clusters dynamics in the central region of the Milky Way. *Publications of the Pulkovo Observatory* 233, с. 1–28.
- (2024b). The influence of the bar on the chaotic dynamics of globular clusters in the central region of the Galaxy. *Publications of the Pulkovo Observatory* 235, с. 1–15.
- (2025). New Method for Analyzing Orbital Dynamics of Globular Clusters in the Central Region of the Milky Way. *Publications of the Pulkovo Observatory* 236, с. 1–22.
- Vasiliev, Eugene и Holger Baumgardt (2021). Gaia EDR3 view on galactic globular clusters. *MNRAS* 505.4, с. 5978–6002.
- Baumgardt, H. и E. Vasiliev (2021). Accurate distances to Galactic globular clusters through a combination of Gaia EDR3, HST, and literature data. *MNRAS* 505.4, с. 5957–5977.
- Palous, J., B. Jungwiert и J. Kopecky (1993). Formation of rings in weak bars : inelastic collisions and star formation. *A&A* 274, с. 189–202.
- Sanders, Jason L., Leigh Smith, N. Wyn Evans и Philip Lucas (2019). Transverse kinematics of the Galactic bar-bulge from VVV and Gaia. *MNRAS* 487.4, с. 5188–5208.
- Machado, R. E. G. и T. Manos (2016). Chaotic motion and the evolution of morphological components in a time-dependent model of a barred galaxy within a dark matter halo. *MNRAS* 458.4, с. 3578–3591.
- Nieuwmunster, N. и др. (2024). Orbital analysis of stars in the nuclear stellar disc of the Milky Way. *A&A* 685, A93.
- Valluri, Monica, Victor P. Debattista, Thomas Quinn и Ben Moore (2010). The orbital evolution induced by baryonic condensation in triaxial haloes. *MNRAS* 403.1, с. 525–544.
- Murray, Carl D. и Stanley F. Dermott (1999). *Solar System Dynamics*.
- Morbidelli, Alessandro (2002). *Modern celestial mechanics : aspects of solar system dynamics*.
- Чумак, Олег (2011). *Энтропии и фракталы в анализе данных*, с. 162.

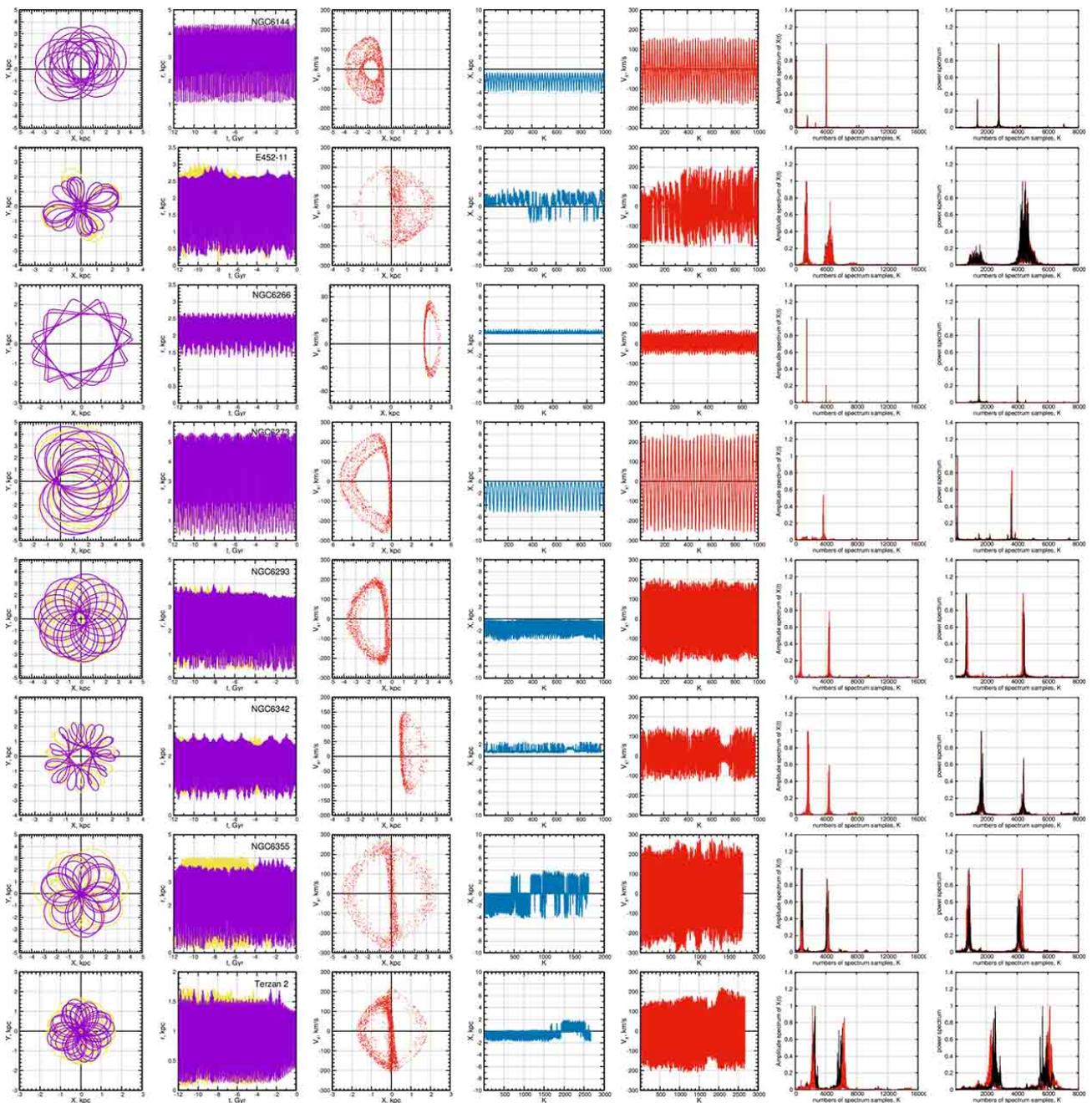
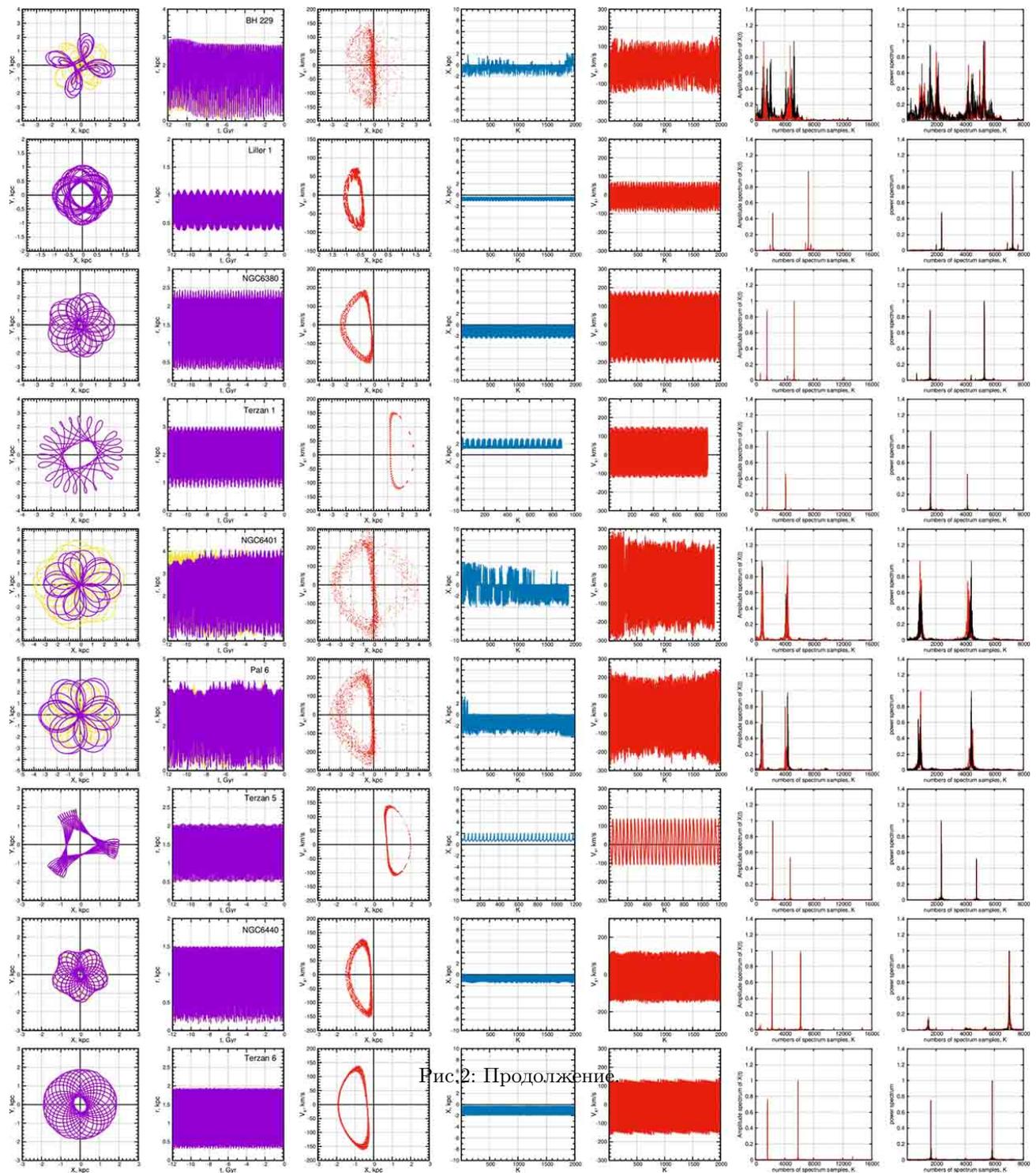
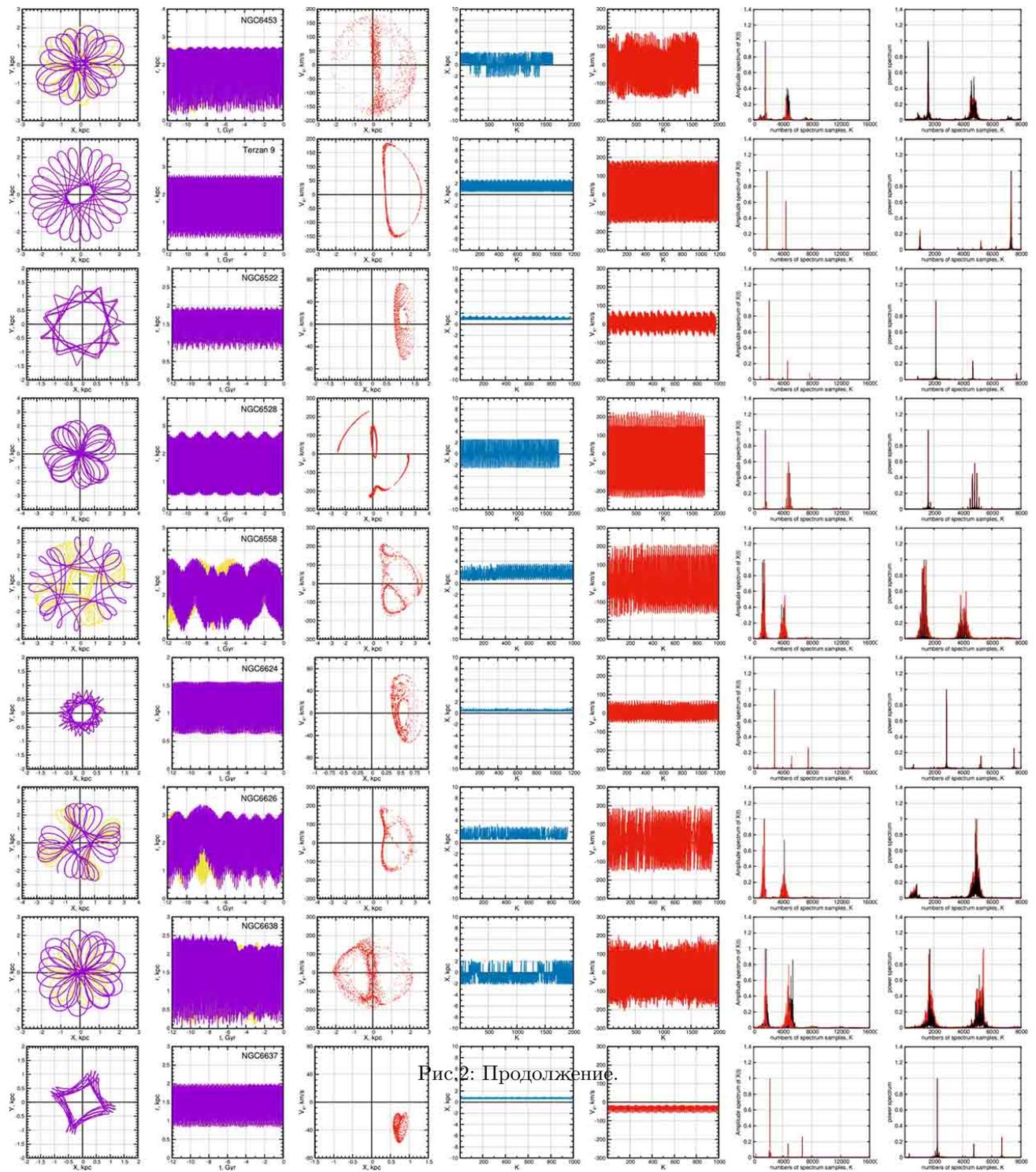


Рис. 2: Орбиты паровых скоплений. На панелях слева направо: $X - Y$ проекции орбит; радиальные значения производных (опорных) и возмущенных (теневых) орбит в зависимости от времени (желтым цветом показаны опорные орбиты, фиолетовым – теневые); сечения Пуанкаре $X - V_x$; X - координаты сечений Пуанкаре; V_x - координаты сечений Пуанкаре; нормализованные спектры мощности X - значений опорных и теневых орбит как функций времени, показанные черным и красным цветом соответственно, и иллюстрация к частотному методу (красным цветом показан спектр мощности первой половины временной последовательности, черным – второй половины). Наименования ШС указаны на вторых панелях слева.





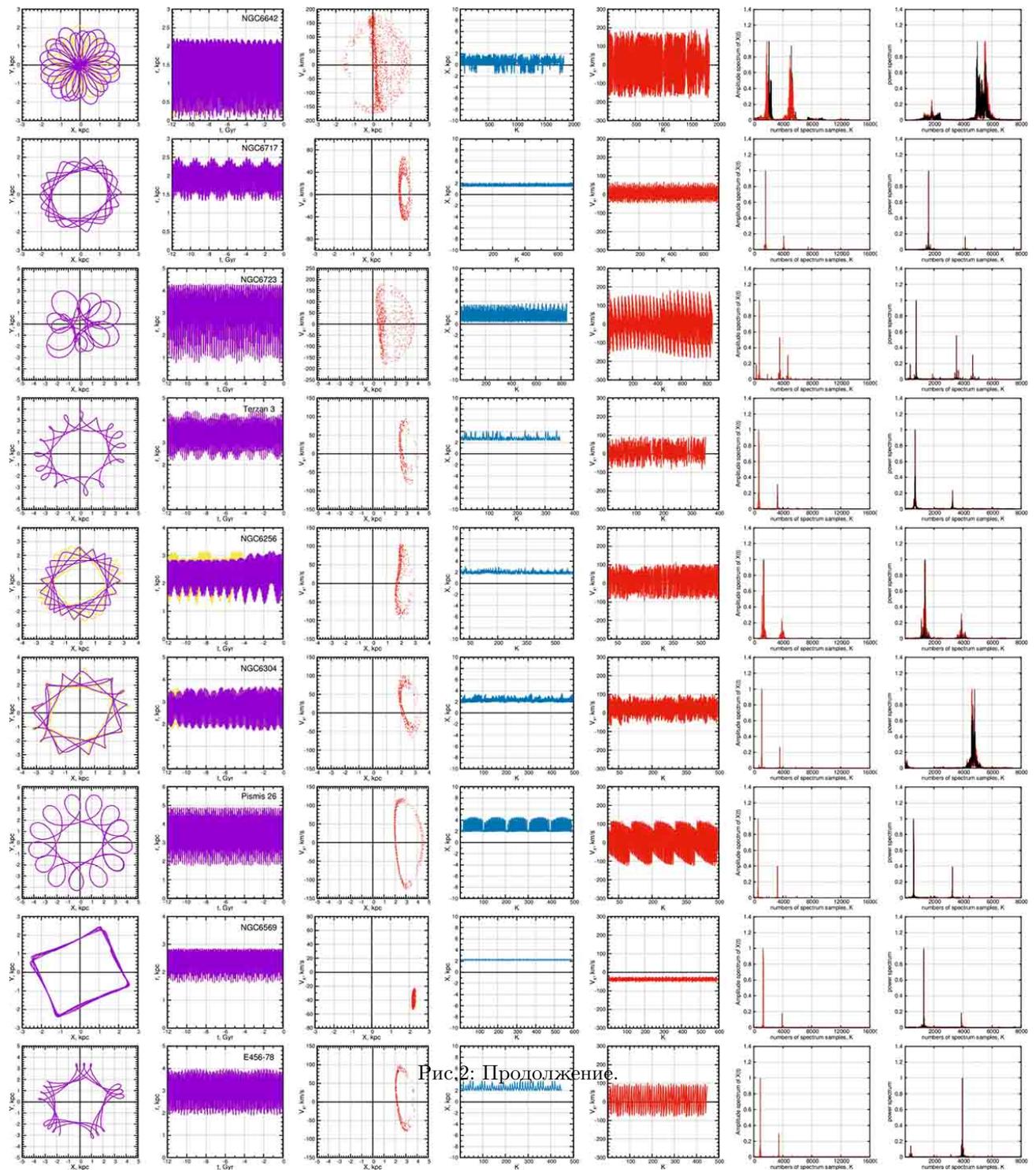


Рис.2: Продолжение.

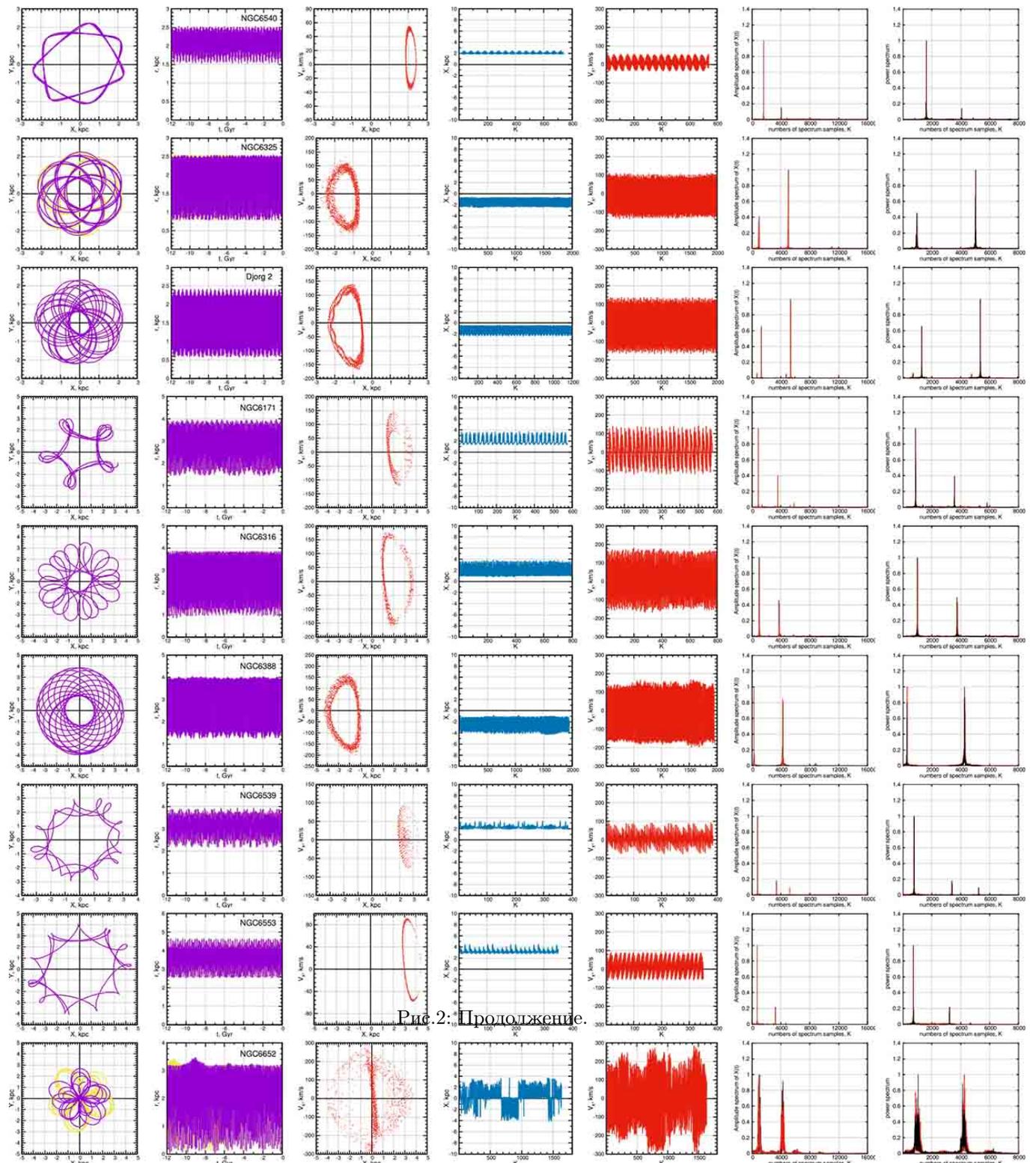


Рис 2: Продолжение.

On the relationship between Poincaré sections and spectral characteristics of orbits of globular clusters in the central region of the Galaxy

A.T. Bajkova¹, A.A. Smirnov¹, V.V. Bobylev¹

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 28 May 2025 / Accepted 17 June 2025

Abstract

This work continues the authors' research (see issues 233, 235 and 236 of *Izvestia GAO Pulkovo*) into the orbital dynamics — regular or chaotic — of globular clusters (GCs) in the central region of the Galaxy, which is most influenced by the rotating bar. This work is devoted to the consideration of such methods for determining chaos as Poincaré sections and spectral methods. The result of the work is an assessment of the relationship between the Poincaré sections and the spectral characteristics of the orbits. As before, the sample includes 45 globular clusters in the central region of the Galaxy with a radius of 3.5 kpc. To form the 6D phase space required for integrating the orbits, we used the most accurate astrometric data to date from the Gaia satellite (Vasiliev, Baumgardt, 2021), as well as new refined average distances (Baumgardt, Vasiliev, 2021). The following, most realistic parameters of the bar are adopted: mass $10^{10}M_{\odot}$, length of the major semiaxis of the bar model in the form of a three-band ellipsoid 5 kpc, angle of rotation of the bar axis 25° , rotation velocity 40 km/s/kpc. The result of the work is that a 100% correlation between the classification by Poincaré sections and the spectral characteristics of the orbits is established. As a result, the classification by Poincaré sections can be replaced by a more visual analysis of the amplitude spectra of the orbits. As a result, 2 lists of GCs are compiled: with regular and chaotic dynamics. GCs with varying degrees of orbital chaos are singled out separately.

key words: Galaxy, bar, globular clusters, chaotic orbital dynamics

Таблица 1: Сравнительная таблица признаков регулярности (R) и хаотичности (C) орбит 45 ШС в центральной области Галактики, полученных различными методами. [1] в первой строке означает, что динамический статус скопления был определен тем или иным методом в работе Vajkova, Smirnov и Bobylev, 2024a.

№	Название ШС	Оценка по энтропии $E_r(k)$ (3) спектра \bar{r}_k (2) [1]	Оценка по дрейфу частот (1) [1]	Визуальная оценка [1]	Сечения Пуанкаре [1]	Оценка по спектрам \bar{X}_k (4), \bar{V}_{xk} (5)
1	NGC6144	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
2	E452-11	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
3	NGC6266	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
4	NGC6273	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
5	NGC6293	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
6	NGC6342	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
7	NGC6355	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
8	Terzan2	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
9	Terzan4	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
10	BH229	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
11	Liller1	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
12	NGC6380	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
13	Terzan1	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
14	NGC6401	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
15	Pal6	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
16	Terzan5	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
17	NGC6440	(C)	(C)	(C)	(R)	(R)
18	Terzan6	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
19	NGC6453	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
20	Terzan9	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
21	NGC6522	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
22	NGC6528	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
23	NGC6558	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
24	NGC6624	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
25	NGC6626	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
26	NGC6638	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
27	NGC6637	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
28	NGC6642	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
29	NGC6717	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
30	NGC6723	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
31	Terzan3	(C)	(R)	(R)	(R)	(R)
32	NGC6256	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)
33	NGC6304	(R)	(C)	(C)	(C)	(C)
34	Pismi26	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
35	NGC6569	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
36	E456-78	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
37	NGC6540	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
38	NGC6325	(C)	(R)	(C)	(C)	(C)
39	Djorg2	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
40	NGC6171	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
41	NGC6316	(C)	(R)	(R)	(R)	(R)
42	NGC6388	(C)	(C)	(R)	(C)	(C)
43	NGC6539	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
44	NGC6553	(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
45	NGC6652	(C)	(C)	(C)	(C)	(C)