

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Математико-механический факультет

Кафедра небесной-механики

Матвиенко Антон Сергеевич

**ДИНАМИКА ШИРОКИХ ПАР НА РАЗНЫХ
ГАЛАКТОЦЕНТРИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЯХ**

Выпускная квалификационная работа

Допущена к защите.

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., проф. К. В. Холшевников

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., проф. В. В. Орлов (мат.-мех. СПбГУ).

Рецензент:

д.ф.-м.н., ст. научн. сотр. В. В. Бобылев (ГАО РАН).

Санкт-Петербург

2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Mathematics & Mechanics Faculty

Chair celestial mechanics

Matvienko Anton Sergeevich

**DYNAMICS OF WIDE PAIRS ON DIFFERENT
GALACTOCENTRIC DISTANCES**

Final Qualifying Work

Admitted for defence.

Head of the chair:

Sc.D, professor K. V. Kholoshevnikov

Scientific supervisor:

Sc.D, professor V. V. Orlov (faculty of mat. and mech. SPSU)

Reviewer:

Sc.D, senior scientific researcher V. V. Bobylev (GAO RAS)

Saint Petersburg

2016

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	2
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	3
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ	6
ЭФФЕКТ БАРА	12
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	19

ВВЕДЕНИЕ

В нашей Галактике в близкой окрестности Солнца наблюдается значительное число широких двойных и кратных звезд, расстояния между компонентами которых достигают нескольких парсек (см., например, Шанапе и Гулд 2004). Типичным примером таких систем является ближайшая к Солнцу тройная система, компонентами которой являются Проксима и визуально двойная звезда α Центавра АВ. Можно ожидать, что подобные системы могут находиться и на других расстояниях R_0 от центра Галактики. Цель нашей работы состоит в том, чтобы исследовать относительные движения компонентов в широких парах и оценить области ограниченных движений компонентов в регулярном Галактическом поле в зависимости от R_0 .

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модель потенциала Галактики была взята из работы Феллхауэра и др. (2006). В этой модели галактический потенциал представляет собой сумму потенциалов гало (логарифмический), диска (модель Miyamoto–Nagai) и балджа (модель Hernquist):

$$\Phi = \Phi_d + \Phi_b + \Phi_h, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Phi_h &= \frac{v_0^2}{2} \cdot \ln(x^2 + y^2 + \frac{z^2}{q_\phi^2} + d^2), \\ \Phi_d &= -\frac{G \cdot M_d}{\sqrt{x^2 + y^2 + (b + \sqrt{z^2 + c^2})^2}}, \\ \Phi_b &= -\frac{G \cdot M_b}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + a}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где v_0 , d , q_ϕ — параметры гало (характеристики скорости, размера и сплюснутости); M_d , M_b — массы диска и балджа; b , c — характерные параметры длины и толщины диска; a — характерный размер балджа. Значения параметров рассмотренной модели приведены в табл. 1.

Таблица 1: Параметры модели потенциала Галактики

Параметр	Принятое значение	Единицы измерения
M_d	10^{11}	M_\odot
b	6.5	кпк
c	0.26	кпк
M_b	$3.4 \cdot 10^{10}$	M_\odot
a	0.7	кпк
v_0	186	км/с
q_ϕ	1	-
d	12	кпк

В данной работе применялся алгоритм вычислений, разработанный нами ранее (Матвиенко и Орлов, 2015). Будем рассматривать движение звезд в прямоугольной галактоцентрической системе x , y , z : оси x и y лежат в плоскости диска, ось z направлена к галактическому северному полюсу. Численно интегрировались уравнения движения компонентов в этой системе отсчета. При этом учитывалось гравитационное взаимодействие компонентов двойной системы друг с другом и с внешним стационарным регулярным полем Галактики.

Массы компонентов принимались равными одной массе Солнца. Масса Галактики в пределах солнечного круга $\sim 10^{11} M_{\odot}$. Была использована следующая система единиц: единица массы — масса Солнца, единица расстояния — один парсек, единица времени — один миллион лет. В принятых единицах гравитационная постоянная $G = 4.298 \cdot 10^{-3}$, а единица скорости примерно равна 1 км/с.

Начальные условия задавались с помощью трех параметров:

- 1) расстояние r_0 между компонентами пары;
- 2) модуль относительной скорости v_0 компонентов;
- 3) α_0 — угол наклона вектора \mathbf{v}_0 к плоскости Галактики.

В начальный момент времени компоненты лежат на оси абсцисс. Расстояние R_0 от центра Галактики до компонента А варьировалось. Выбирались значения $R_0 = 1, 2, 4, 8, 16, 32$ кпк. Расстояние от центра Галактики до компонента В равно $R_0 + r_0$. Систематические скорости V_0 компонентов А и В выбирались равными круговой скорости при соответствующем значении R_0 в плоскости диска

$$V_0 = \sqrt{R \frac{\partial \Phi}{\partial R}}(R = R_0, z = 0), \quad (3)$$

Значения круговой скорости для принятых значений R_0 равны $V_0 = 228, 214, 210, 222, 227, 217$ км/с. Вектора систематических скоростей компонентов лежат в Галактической плоскости и направлены перпендикулярно оси абсцисс в сторону вращения Галактики. К вектору скорости компонента В добавляется вектор скорости \mathbf{v}_0 относительно вектора скорости компонента А (вектор \mathbf{v}_0 ортогонален оси абсцисс). Центр масс пары движется приблизительно в плоскости Галактики по круговой орбите с радиусом R_0 .

Значения угла α_0 фиксировались и принимались равными $\alpha_0 = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$. Угол $\alpha_0 = 0^\circ$ соответствует вращению двойной в плоскости Галактики, причем вращение происходит в направлении вращения Галактики (прямые движения); угол $\alpha_0 = 180^\circ$ соответствует вращению двойной в плоскости Галактики в сторону, противоположную Галактическому вращению (обратные движения). Расстояние r_0 варьировалось в интервале $[0.1, 5]$ пк с шагом $\Delta r_0 = 0.01$ пк, а модуль относительной скорости v_0 варьировался в интервале $[0.01, 0.5]$ км/с с шагом $\Delta v_0 = 0.01$ км/с. Для каждого варианта начальных условий вычисления орбит производились с помощью численного интегрирования уравнений движения методом Рунге–Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага.

Как и ранее (Матвиенко и Орлов 2015), эволюция прослеживалась до момента выполнения одного из трех условий:

1) время достигает 10 млрд. лет (двойная остается ограниченной в пространстве на этом интервале времени);

2) расстояние между компонентами становится больше критического значения, принятого равным 20 пк (двойная разрушается);

3) происходит тесное сближение компонентов на расстояние, меньшее 1 а.е. (“столкновение”).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты в зависимости от R_0 представлены на рис. 1–5. На рисунках точками нанесены начальные условия (r_0, v_0) , соответствующие двойным системам первого типа, в которых движения компонентов остаются ограниченными в течение, по крайней мере, 10 млрд. лет (плюсики соответствуют “столкновениям”). Для всех рассмотренных значений угла α_0 выделяется область ограниченных движений вблизи начала координат. Размер этой области зависит от расстояния R_0 — область уменьшается с уменьшением R_0 . Радиус области примерно соответствует приливному радиусу в Галактическом поле. Сверху эта область ограничена гладкой кривой гиперболического типа. При $\alpha_0 = 180^\circ$ (двойная вращается в сторону, противоположную вращению Галактики) область устойчивости имеет более сложную структуру (рис. 5) и состоит из двух частей: основной части, примыкающей к началу координат и к оси ординат, и вытянутого ответвления, отходящего вправо и вверх от основной части. С увеличением расстояния R_0 ответвление стремится стать параллельным оси r_0 в области начальных условий.

На рис. 1–5 имеются точки, в которых происходят тесные сближения двух звезд — так называемые “столкновения” компонентов. Особенно часто “столкновения” происходят при $\alpha_0 = 90^\circ$, когда орбитальная плоскость двойной ортогональна плоскости Галактики (см. рис. 3). Множества точек “столкновений” на плоскости (r_0, v_0) концентрируются вблизи начала координат и вблизи оси абсцисс. “Столкновения” происходят за счет сильного увеличения эксцентриситета двойной системы. Возможно, этот эффект имеет ту же природу, что и известный эффект Лидова (1961) и Козаи (1962) в иерархических тройных системах точечных тел, когда орбитальные плоскости внутренней и внешней двойных наклонены под значительным углом. На всех рис. 1–5 белые области соответствуют случаям разрушения двойных.

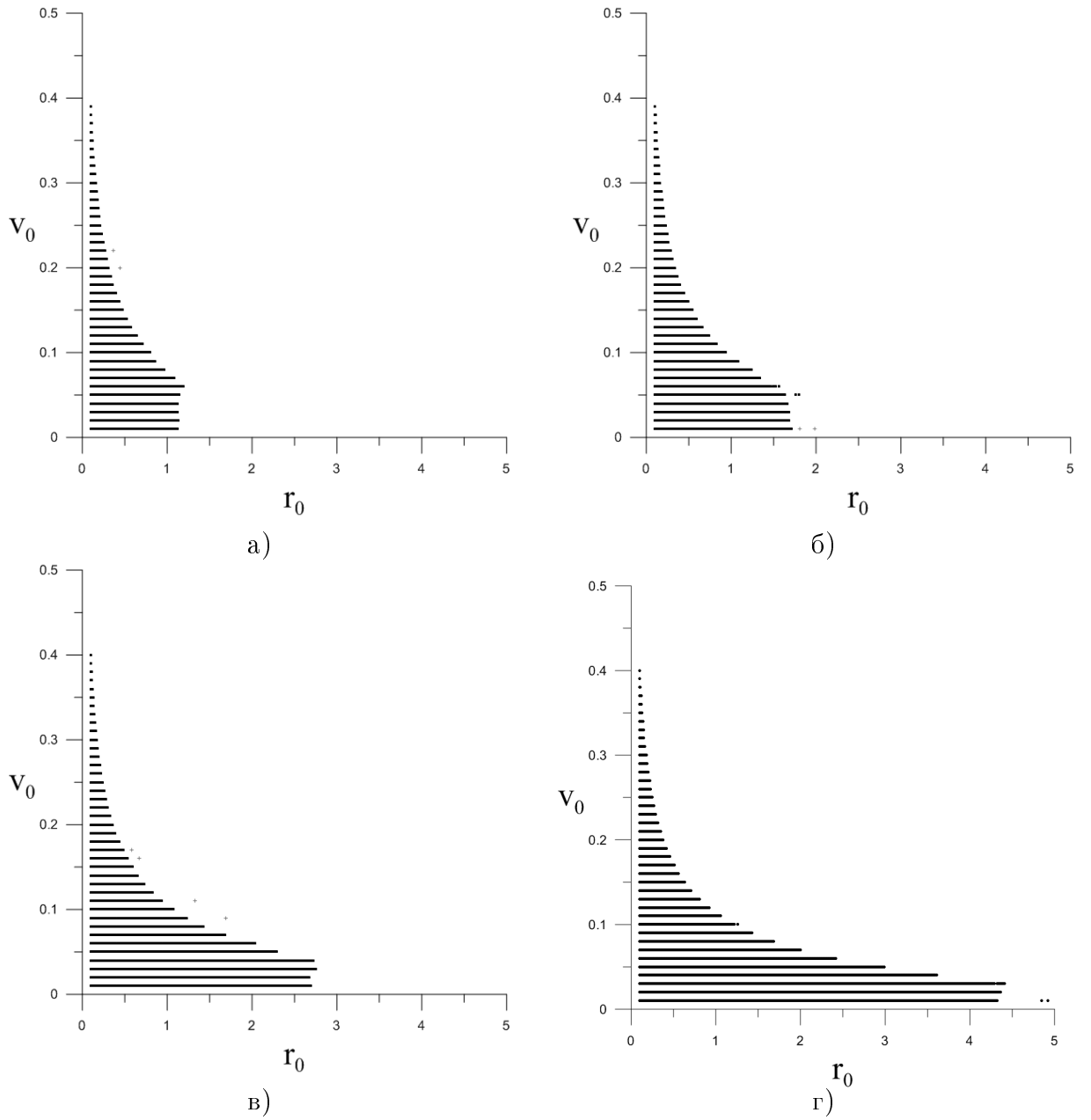


Рис. 1: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 0^\circ$: а) $R_0 = 4$ кпк; б) $R_0 = 8$ кпк; в) $R_0 = 16$ кпк; г) $R_0 = 32$ кпк.

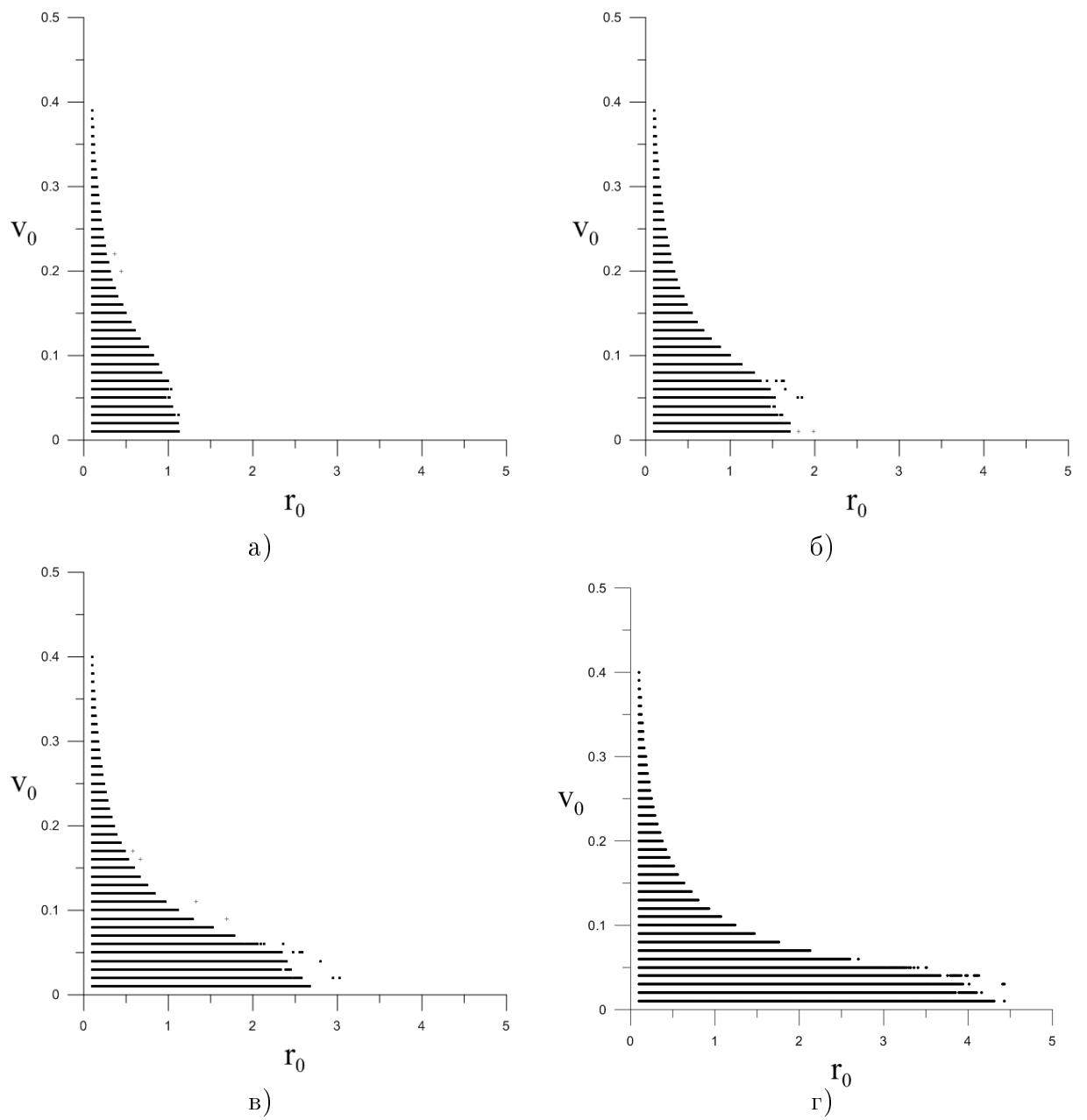


Рис. 2: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 45^\circ$: а) $R_0 = 4$ кпк; б) $R_0 = 8$ кпк; в) $R_0 = 16$ кпк; г) $R_0 = 32$ кпк.

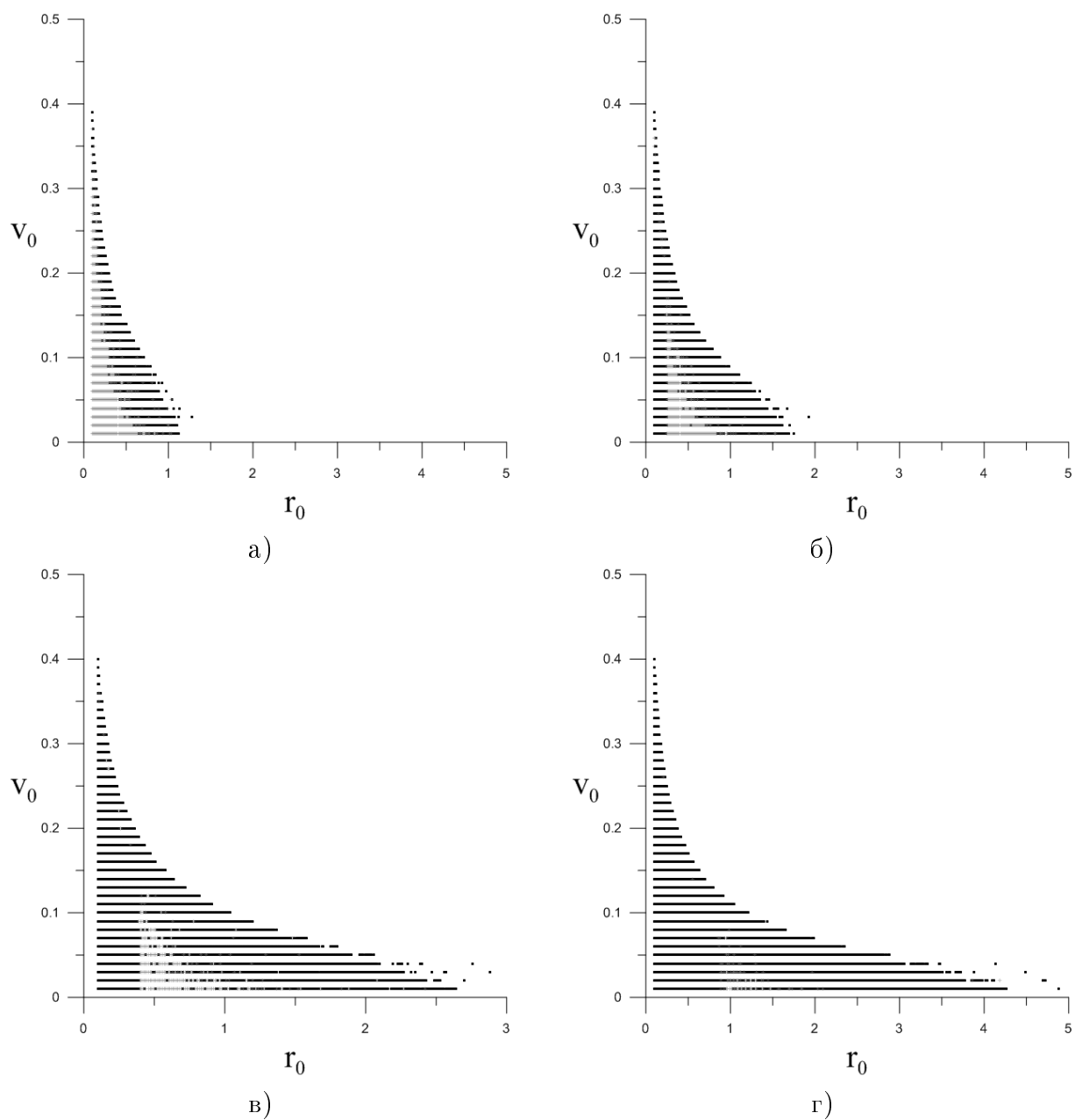


Рис. 3: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 90^\circ$: а) $R_0 = 4$ кпк; б) $R_0 = 8$ кпк; в) $R_0 = 16$ кпк; г) $R_0 = 32$ кпк.

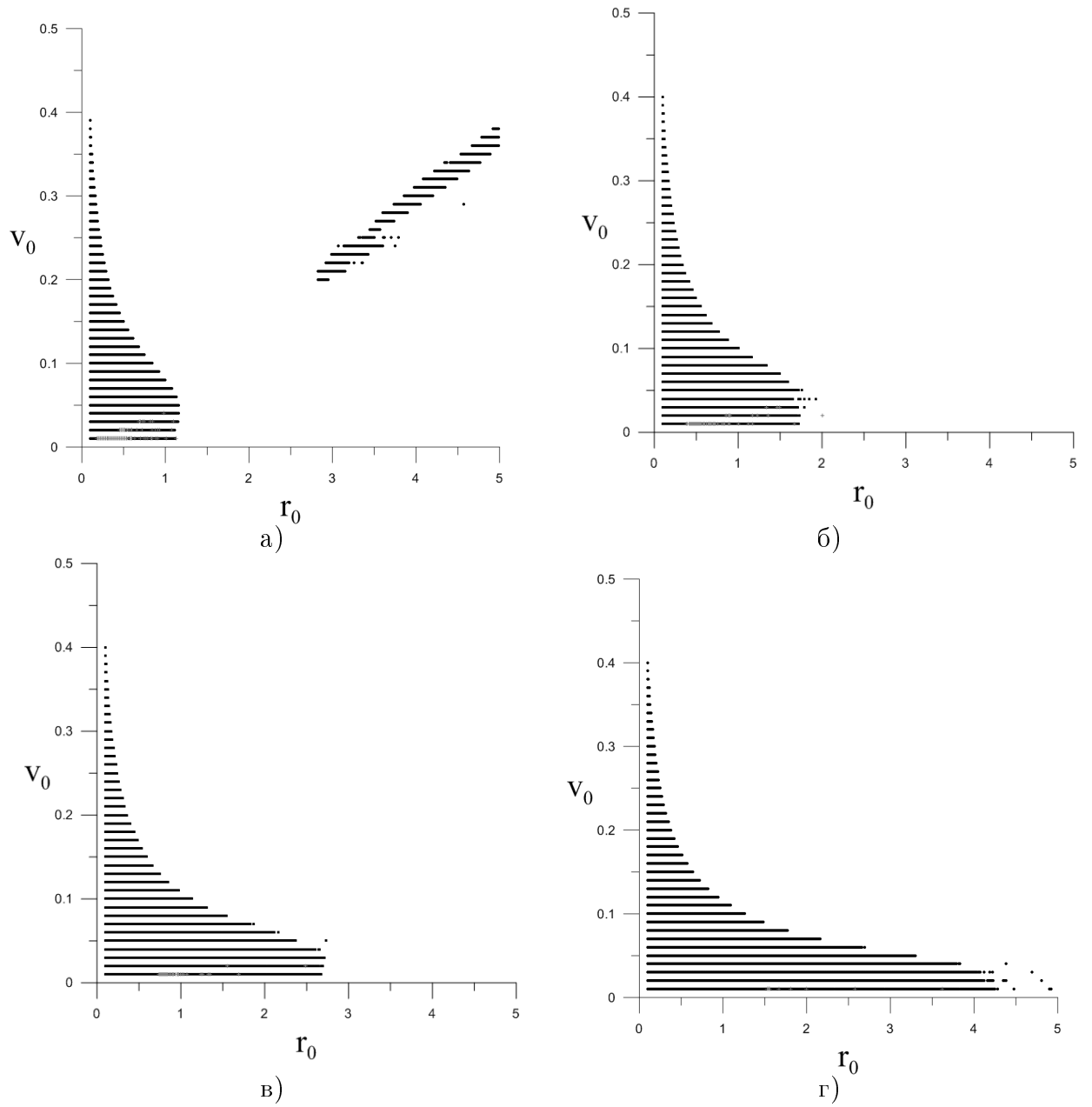


Рис. 4: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 135^\circ$: а) $R_0 = 4$ кпк; б) $R_0 = 8$ кпк; в) $R_0 = 16$ кпк; г) $R_0 = 32$ кпк.

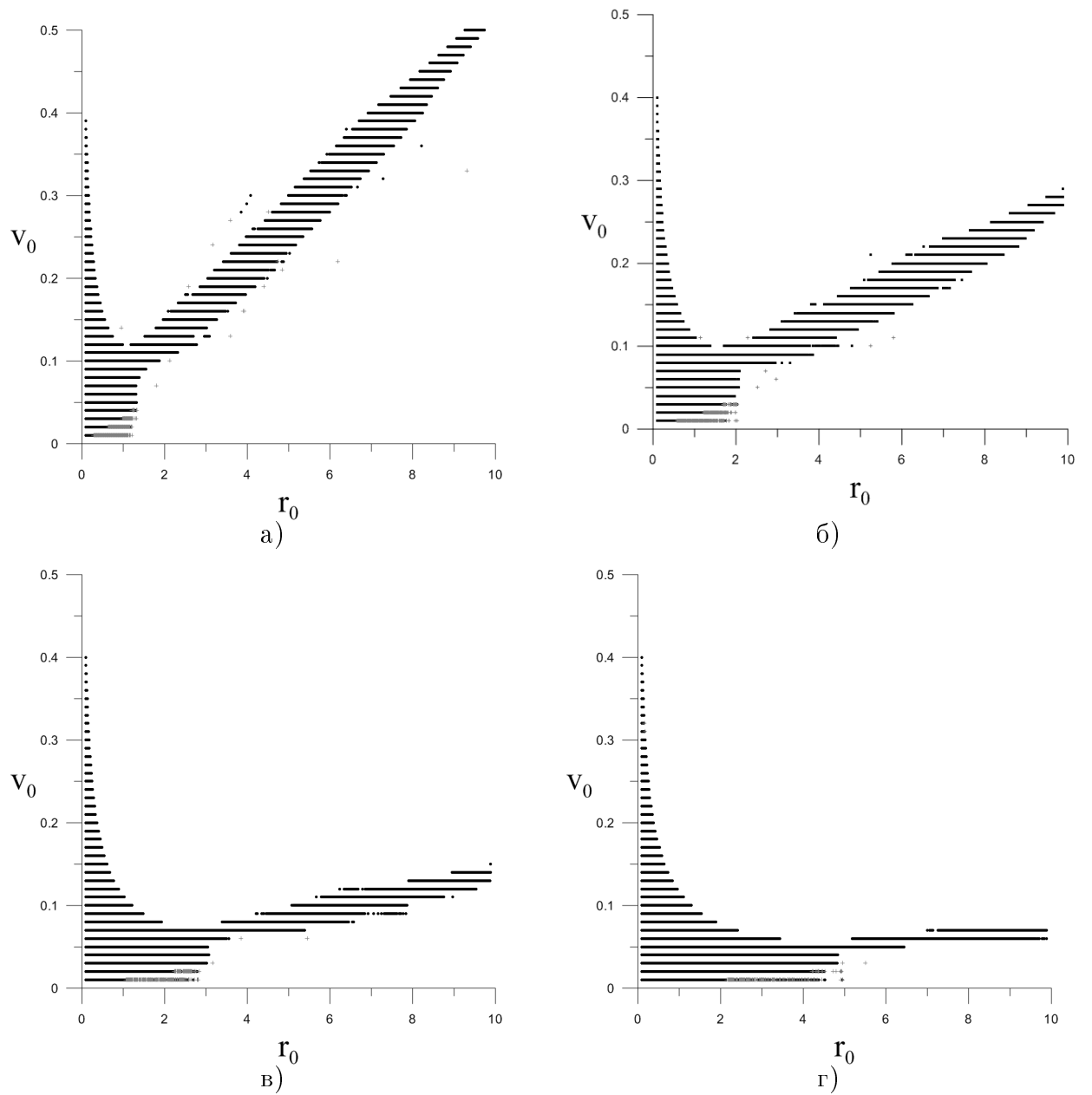


Рис. 5: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 180^\circ$: а) $R_0 = 4$ кпк; б) $R_0 = 8$ кпк; в) $R_0 = 16$ кпк; г) $R_0 = 32$ кпк.

ЭФФЕКТ БАРА

На небольших расстояниях от центра Галактики существенное влияние на динамику широких пар может оказывать бар. Для исследования эффекта бара нами была проведена серия численных экспериментов при $R_0 = 1, 2$ кпк. С одной стороны, была рассмотрена модель ротационно-симметричного потенциала (1). С другой стороны, к модели (1) был добавлен вращающийся бар массой $M_{\text{bar}} = 1.0 \cdot 10^9 M_{\odot}$. При этом масса балджа M_b была уменьшена на эту величину с сохранением его размера a . Потенциал бара был взят в виде (Палоуш и др. 1993):

$$\Phi_{\text{bar}} = - \frac{GM_{\text{bar}}}{\sqrt{q_{\text{bar}}^2 + x^2 + y^2 \left(\frac{a_{\text{bar}}}{b_{\text{bar}}}\right)^2 + z^2 \left(\frac{a_{\text{bar}}}{c_{\text{bar}}}\right)^2}}, \quad (4)$$

где $q_{\text{bar}} = 5.0$ кпк, $\frac{a_{\text{bar}}}{b_{\text{bar}}} = \frac{1}{0.42}$, $\frac{a_{\text{bar}}}{c_{\text{bar}}} = \frac{1}{0.33}$. Предполагается, что бар вращается жестко. Угловая скорость вращения бара равна $\Omega_{\text{bar}} = 57.8$ км/с/кпк. Период вращения бара составляет 108 млн. лет.

Результаты в зависимости от R_0 и от наличия бара представлены на рис. 6–10. Из рисунков видно, что наличие бара приводит к небольшому уменьшению размеров области ограниченных движений. Кроме того, границы области становятся менее четкими. Заметим, что при всех рассмотренных значениях угла $\alpha_0 \geq 90^\circ$ имеются области начальных условий, в которых происходят сближения компонентов пары на расстояние меньше 1 а.е.

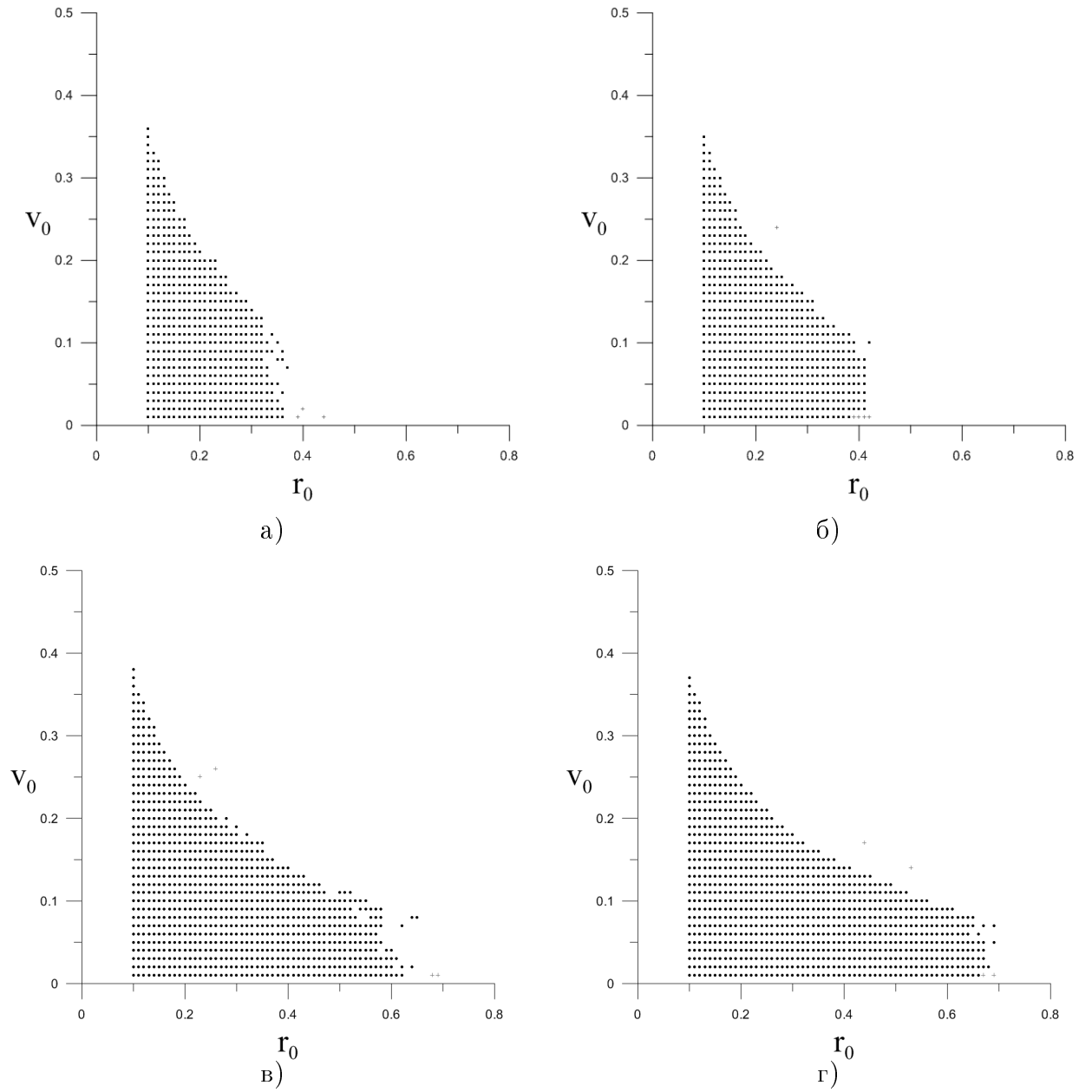


Рис. 6: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 0^\circ$: а) $R_0 = 1$ кпк, бар присутствует; б) $R_0 = 1$ кпк, бар отсутствует; в) $R_0 = 2$ кпк, бар присутствует; г) $R_0 = 2$ кпк, бар отсутствует.

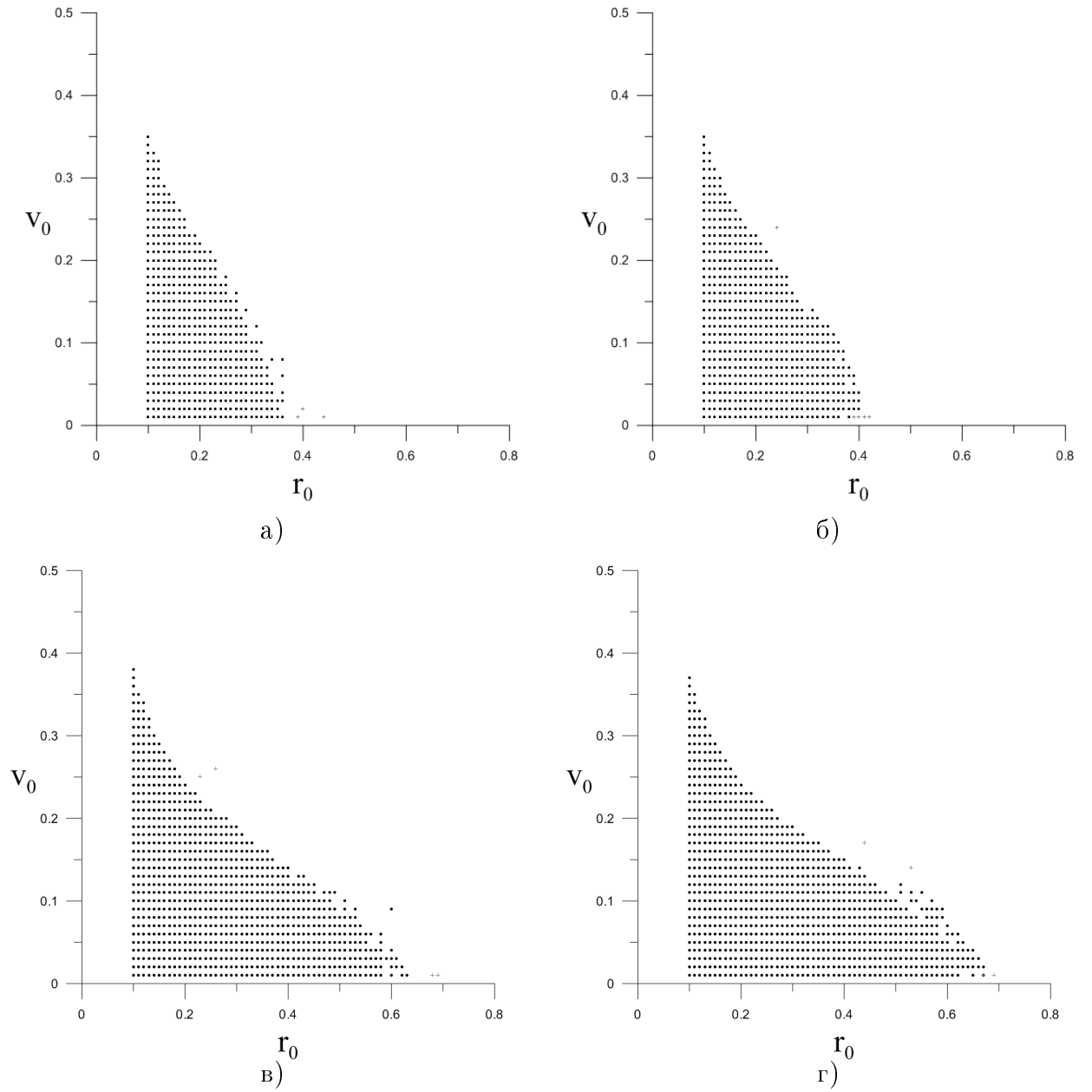


Рис. 7: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 45^\circ$: а) $R_0 = 1$ кпк, бар присутствует; б) $R_0 = 1$ кпк, бар отсутствует; в) $R_0 = 2$ кпк, бар присутствует; г) $R_0 = 2$ кпк, бар отсутствует.

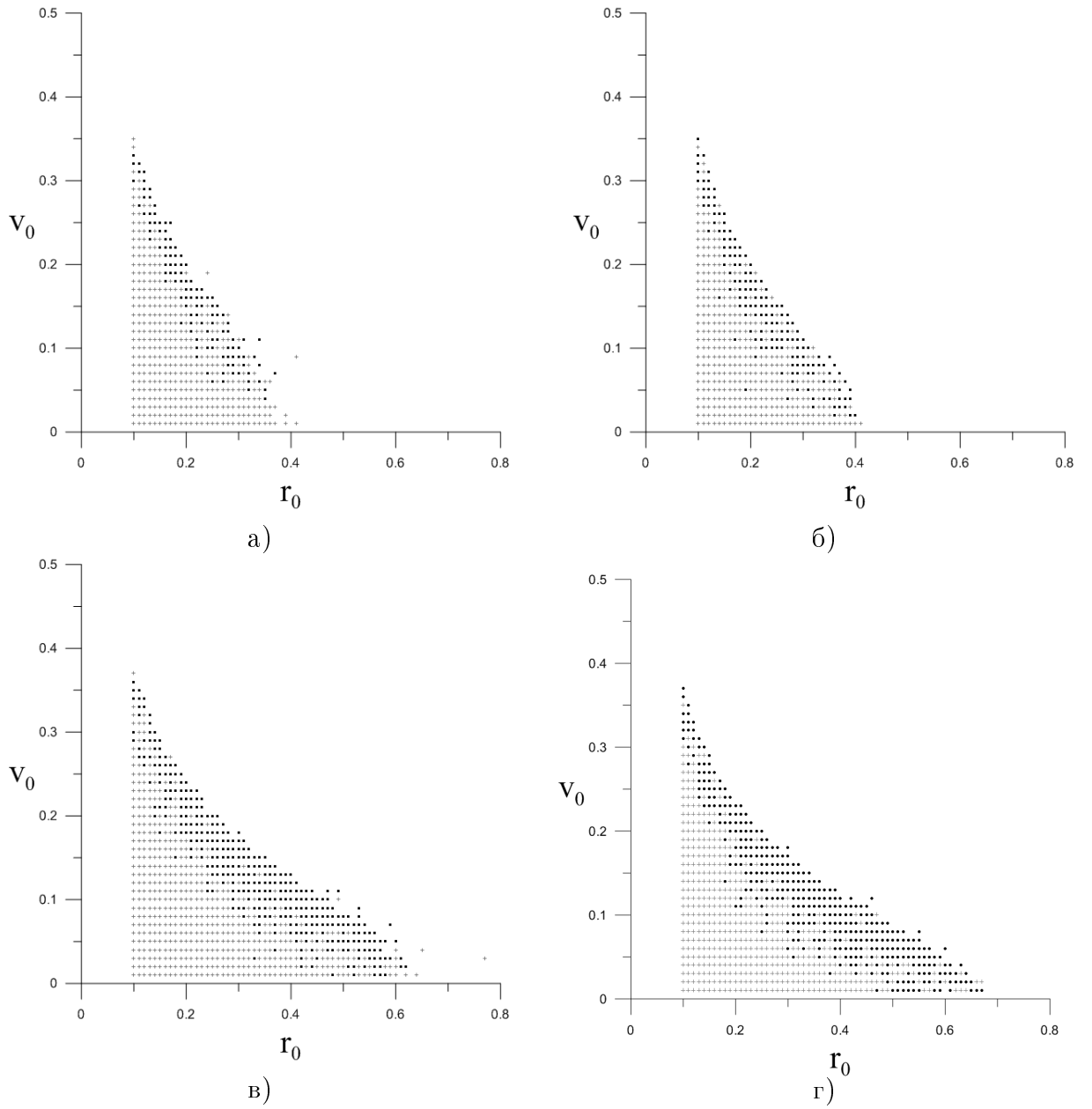


Рис. 8: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 90^\circ$: а) $R_0 = 1$ кпк, бар присутствует; б) $R_0 = 1$ кпк, бар отсутствует; в) $R_0 = 2$ кпк, бар присутствует; г) $R_0 = 2$ кпк, бар отсутствует.

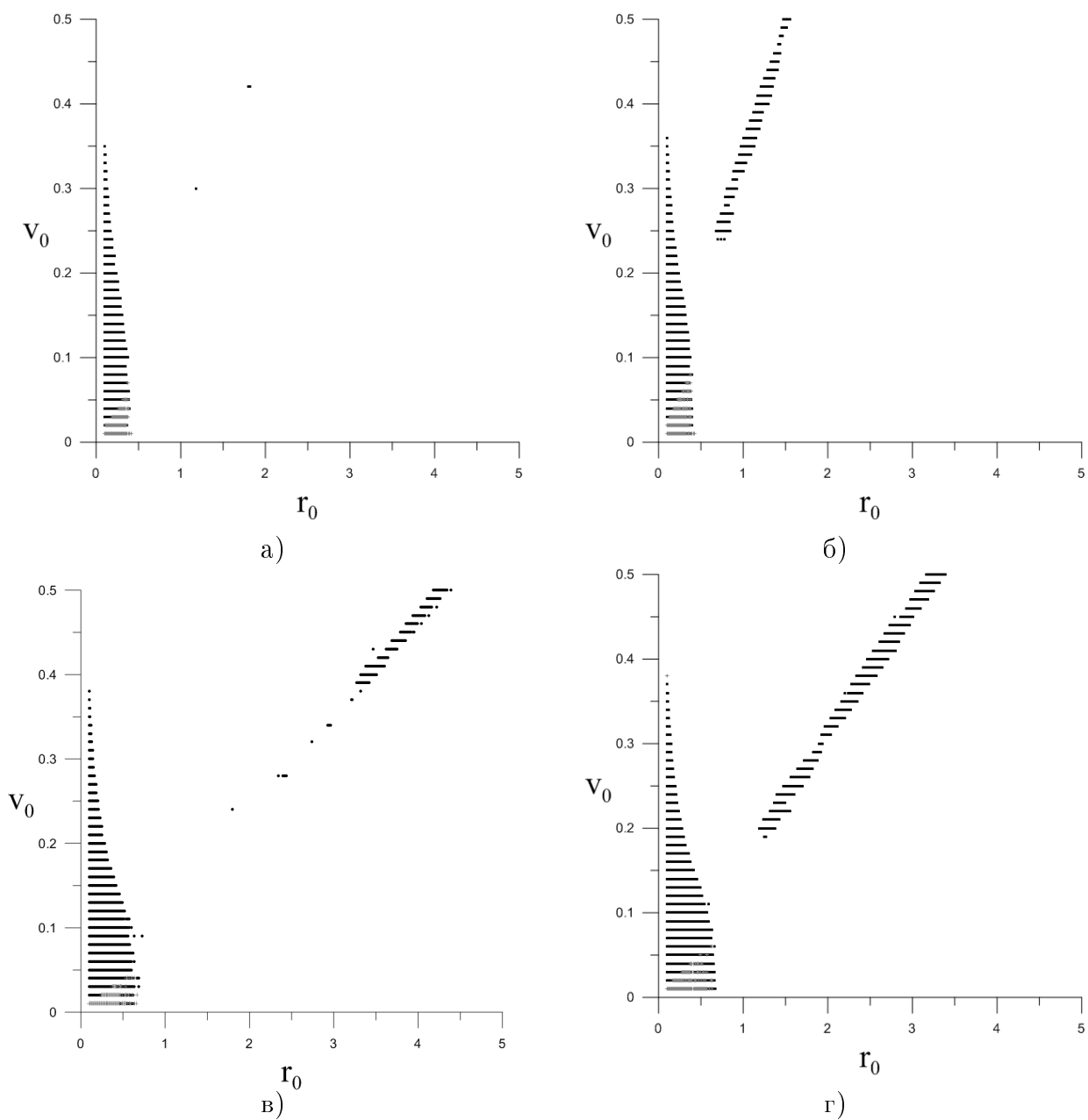


Рис. 9: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 135^\circ$: а) $R_0 = 1$ кпк, бар присутствует; б) $R_0 = 1$ кпк, бар отсутствует; в) $R_0 = 2$ кпк, бар присутствует; г) $R_0 = 2$ кпк, бар отсутствует.

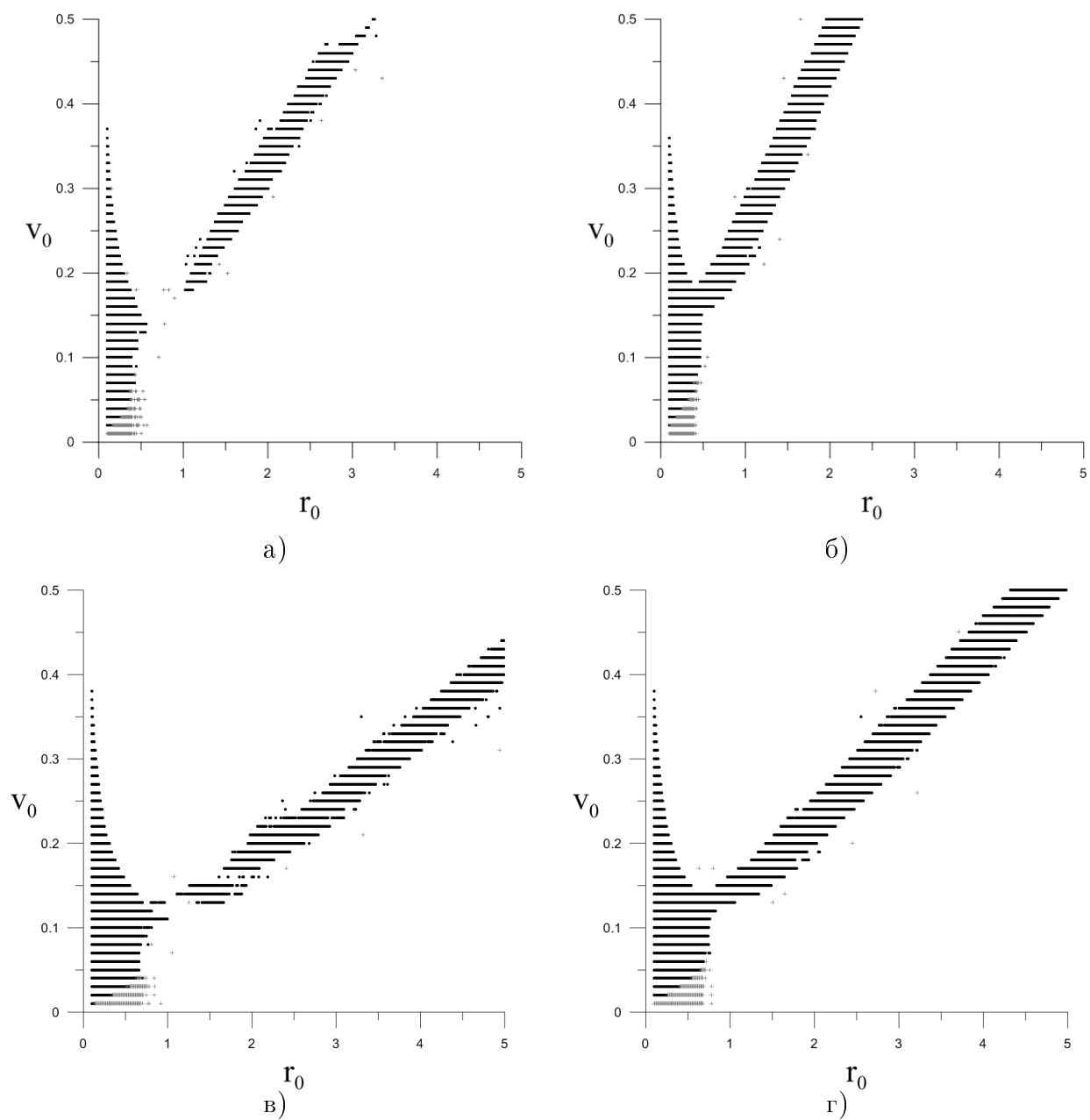


Рис. 10: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (плюсики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 180^\circ$: а) $R_0 = 1$ кпк, бар присутствует; б) $R_0 = 1$ кпк, бар отсутствует; в) $R_0 = 2$ кпк, бар присутствует; г) $R_0 = 2$ кпк, бар отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численного моделирования исследованы траектории движения компонентов широких двойных звезд в регулярном гравитационном поле Галактики для различных расстояний R_0 от центра Галактики. При значениях $R_0 = 1, 2$ кпк рассмотрены две модели: при наличии бара и в его отсутствии. Во всех случаях локализованы области ограниченных относительных движений компонентов и области “столкновений” в зависимости от начальных условий: относительной скорости v_0 компонент, их взаимного расстояния r_0 и угла α_0 наклона вектора относительной скорости к плоскости Галактики. Основная область ограниченных движений примыкает к осям координат на плоскости (r_0, v_0) и ограничена сверху кривой гиперболического типа. Размер этой области ограниченных движений в координатном пространстве существенно зависит от R_0 и по порядку величины равен приливному радиусу. В случае обратных движений имеется вытянутое ответвление области ограниченных движений, в ряде случаев простирающееся по крайней мере до $r_0 \approx 10$ пк.

При углах наклона, близких к 90° , происходят сильные изменения наклона орбитальной плоскости к плоскости Галактики и эксцентриситета орбиты двойной, которые могут приводить к тесным сближениям звезд с перицентрическим расстоянием меньше 1 а.е. Вблизи центра Галактики этот эффект наблюдается при всех рассмотренных значениях угла $\alpha_0 \geq 90^\circ$ независимо от наличия бара. Максимально выражен эффект $\alpha_0 = 90^\circ$ (орбита двойной ортогональна плоскости Галактики). Этот эффект напоминает известный эффект Лидова–Козаи в задаче трех тел. Во всех рассмотренных нами вариантах моделирования наблюдаются циклические изменения эксцентриситета и наклона орбиты двойной с периодами порядка сотен миллионов и миллиардов лет, аналогичные циклам Лидова–Козаи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Козаи (Y. Kozai), *Astron. J.*, 67, 591 (1962).

Лидов М.Л., В сб. “Искусственные спутники Земли”, Вып. 8, 5 (1961). Перевод на английский: *Planetary and Space Science*, 9, 719 (1962).

Матвиенко А.С. и Орлов В.В., *Письма в Астрон. журн.* 41, 294 (2015).

Палоуш и др. (J. Palous, B. Jungewiert, and J. Kopecky), *Astron. Astrophys.*, 274, 189 (1993).

Феллхауэр и др. (M. Fellhauer, V. Belokurov, N. W. Evans, et al.), *Astrophys J.*, 651, 167 (2006).

Шанаме и Гулд (J. Chanamé and A. Gould), *Astrophys. J.*, 601, 289 (2004).