

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Подзолкова Екатерина Николаевна

**Влияние бара на кинематику диска Галактики вблизи
внешнего линдбладовского резонанса**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре экспериментальной астрономии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель:

Мельник Анна Маратовна

доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Бобылев Вадим Вадимович

доктор физико-математических наук,

Главная (Пулковская) астрономическая
обсерватория Российской академии наук,
лаборатория динамики Галактики, заведующий
лабораторией

Сильченко Ольга Касьяновна

доктор физико-математических наук,

Государственный астрономический институт
имени П.К. Штернберга МГУ имени
М.В.Ломоносова, заместитель директора
по научной работе

Хоперсков Александр Валентинович

доктор физико-математических наук, профессор,
Волгоградский государственный университет,
Институт математики и информационных
технологий, кафедра информационных систем
и компьютерного моделирования, заведующий
кафедрой

Защита диссертации состоится 17 сентября 2026 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: dissovet@sai.msu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале:

<https://dissovet.msu.ru/dissertation/3982>.

Автореферат разослан 17 июля 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.013.1,

доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность, история и степень разработанности темы исследования

Интерес к исследованию структуры Галактики возрастает всякий раз при появлении новых высокоточных наблюдательных данных. В последние годы изучение кинематики диска Галактики стало особенно актуальным в связи с появлением большого объема качественных данных о положениях, расстояниях и скоростях звезд, полученных космической миссией *Gaia* [1–3]. Каталоги *Gaia* предоставляют беспрецедентно точную информацию о пространственном распределении и движениях миллионов звезд в окрестности Солнца, что позволяет детально исследовать структуру фазового пространства звездного диска Галактики.

Особый интерес представляют области вблизи резонансов неосесимметричных компонентов галактического потенциала, прежде всего бара, поскольку многочисленные данные свидетельствуют о положении внешнего линдбладовского резонанса (OLR) бара Галактики вблизи солнечного круга [4, 5]. Движения звезд вблизи OLR могут служить источником информации о характере резонансных процессов, происходящих в диске Галактики. Понимание процессов настройки движений звезд вблизи резонансов позволяет уточнить наши представления о параметрах бара, структуре и эволюции гравитационного потенциала Галактики.

В отличие от внешних галактик, для которых морфологическая структура может быть определена напрямую из наблюдений, изучение строения Млечного Пути существенно осложняется тем, что наблюдатель находится внутри галактического диска. Это делает необходимым использование косвенных методов, основанных на анализе кинематики и распределения звезд. К тому же, ввиду большого количества пыли в плоскости Галактики, и, следовательно, большого поглощения света, уже на расстояниях $r > 4$ кпк от Солнца становится затруднительно с хорошей точностью определять расстояния до объектов.

Заметными элементами морфологии дисковых галактик являются спиральные рукава. Н II-области, образующиеся вокруг молодых массивных звезд, являются важными индикаторами спиральной структуры галактик. Уже на первых картах распределения Н II-областей в окрестности Солнца были выделены несколько областей их концентрации, названных по созвездиям, в направлении которых они располагались: Стрелец–Киль, Орион–Лебедь и Персей [6]. Было выдвинуто предположение, что эти области являются фрагментами спиральных рукавов Галактики. Сейчас существуют представления о том, что Галактика имеет спиральную структуру и включает четыре спиральные ветви [7].

Теоретической основой интерпретации спиральной структуры стала теория спиральных волн плотности, разработанная Линем и Шу [8]. Согласно этой теории, спиральные рукава являются не материальными структурами, а волнами плотности,

распространяющимися в диске галактики. Звезды и газ, двигаясь по своим орбитам, проходят через эти волны, что приводит к временному увеличению плотности и формированию наблюдаемых спиральных рукавов. Теория волн плотности сыграла важную роль в развитии галактической динамики и долгое время считалась основной моделью формирования спиральной структуры. Однако, теоретические исследования и численные эксперименты показали, что спиральные волны являются нестационарными и эволюционируют на сравнительно коротких временных масштабах. Согласно результатам Тумре, спиральные возмущения в диске не могут существовать длительное время и распадаются за несколько оборотов бара [9]. Это привело к возникновению так называемой проблемы устойчивости спиральных структур, которая решается путем создания стационарного спирального узора, состоящего из двух бегущих спиральных волн, распространяющихся в противоположных направлениях (механизмы WASER или swing amplification [10, 11]).

Дополнительные противоречия возникли при попытке применить теорию волн плотности к Млечному Пути. Наблюдения кинематики ОВ-ассоциаций показали, что некоторые области звездообразования, которые в рамках классической картины должны принадлежать одному и тому же спиральному рукаву, демонстрируют существенно различающиеся кинематические свойства. В частности, области Стрельца и Киля имеют кинематику, противоречащую предположению о том, что они принадлежат одному рукаву, рассматриваемому в рамках теории волн плотности [12]. Эти противоречия указывают на то, что реальная структура диска Галактики может быть значительно более сложной.

Одним из возможных объяснений этих противоречий является существование внешних резонансных колец. Предполагается, что области Стрельца и Киля могут принадлежать резонансным эллиптическим кольцам, формирующимся вблизи внешнего линдбладовского резонанса бара: область Киля может быть фрагментом кольца R_2 , а область Стрельца — фрагментом кольца R_1 [12, 13]. Впервые существование резонансных колец в Галактике было предложено в работе Kalnajs (1991) [14]. Резонансные кольца возникают в результате настройки эпициклических движений звезд вблизи резонансов бара.

Бар — вытянутая структура (в первом приближении эллипсоид) в центральной области галактики, вращающаяся как твердое тело с угловой скоростью Ω_b . Такая структура является распространенной морфологической особенностью дисковых галактик. По современным оценкам, около 70% дисковых галактик содержат бар [15]. Бар может возникать как в результате взаимодействия с другими галактиками, так и вследствие внутренней динамической эволюции диска. Бар играет важную роль в перераспределении углового момента между различными компонентами галактики [16].

В настоящее время наличие бара в Галактике подтверждается многочисленными независимыми исследованиями, от кинематики газа [17,18] до инфракрасных наблюдений [19–21]. Наличие бара существенно влияет на динамику звездного диска. При твердотельном вращении бара в дифференциально вращающемся диске неизбежно возникают резонансы — радиусы, на которых эпициклическая частота κ связана с частотой вращения звезды относительно бара $\Omega - \Omega_b$ следующим образом:

$$\frac{m}{n} = \frac{\kappa}{\Omega - \Omega_b},$$

где m и n — целые числа [22, 23].

Особенно важную роль играют линдбладовские резонансы бара, в частности внешний линдбладовский резонанс (OLR), которому соответствует отношение $m/n = -2/1$, и внутренний линдбладовский резонанс (ILR), которому соответствует отношение $m/n = 2/1$. Ультрагармонические резонансы ($m/n = \pm 4/1$) также играют важную роль [24]. Звезды, захваченные линдбладовскими резонансами, часто демонстрируют периодические изменения направления вытянутости орбиты относительно большой оси бара [25]. Во многих галактиках с баром вблизи резонансов формируются эллиптические резонансные кольца и псевдокольца (разомкнутые кольца).

Можно выделить три основных типа резонансных колец: ядерные, внутренние и внешние. Ядерные кольца расположены вблизи внутреннего линдбладовского резонанса и вытянуты перпендикулярно бару, внутренние кольца находятся вблизи резонанса $4/1$ и вытянуты параллельно бару. Внешние кольца, формирующиеся вблизи OLR бара, подразделяются на два типа: кольца R_1 (псевдокольца R'_1), лежащие немного ближе к центру галактики и вытянутые перпендикулярно бару, и кольца R_2 (R'_2), лежащие дальше от центра и вытянутые параллельно бару. Среди всех дисковых галактик внешние кольца встречаются примерно в 10%–20% случаев.

Несмотря на наличие убедительных свидетельств в пользу существования бара в Галактике, многие его параметры до сих пор являются предметом научных дебатов. Оценки значения позиционного угла бара θ_b — угла между прямой, соединяющей Солнце и центр Галактики, и большой осью бара, варьируются от $\sim 15^\circ$ до $\sim 45^\circ$ [19,21,26]. Обычно предполагается, что бар вращается с угловой скоростью 50–70 км/с/кпк и имеет большую полуось 3–5 кпк. Различные оценки угловой скорости вращения бара Ω_b дают значения в диапазоне 40–60 км/с/кпк [4,13,14,17,27–31]. Возраст галактического бара является предметом научных дискуссий. Оценки, полученные различными методами, варьируются в диапазоне 2–8 млрд лет [32].

Данные, поступающие со спутника *Gaia*, дают уникальную возможность исследовать движения звезд в широкой окрестности Солнца. С каждым обновлением каталога появляются собственные движения и параллаксы, а также лучевые скорости для все большего количества источников. Так, во втором выпуске данных

Gaia DR2 были представлены лучевые скорости для 7.2 млн звезд, тогда как в третьем выпуске, *Gaia* DR3, — уже для 33.8 млн звезд. Выход четвертого выпуска, *Gaia* DR4, запланирован на 2026 год; ожидается, что он будет содержать лучевые скорости для большинства источников, наблюдаемых спектрографом RVS, вплоть до предельной звездной величины $G_{\text{RVS}} \approx 16^{\text{m}}$ [33], что существенно расширит возможности изучения кинематики солнечной окрестности.

Развитие вычислительной техники позволяет проводить моделирование кинематики и динамики Галактики. Модели с аналитическим баром не требуют много вычислительных ресурсов, но хорошо подходят для исследования орбит. Модели Галактики с внешними резонансными кольцами позволяют объяснить многие особенности в распределении звезд в широкой солнечной окрестности [12, 13, 34].

Таким образом, **актуальность** выбранной темы обусловлена рядом взаимосвязанных факторов:

- За последние годы появились новые высокоточные наблюдательные данные, что существенно расширяет возможности анализа кинематики и морфологии Галактики. Использование этих данных позволяет получать более детализированное и надежное представление о структуре и кинематике Млечного Пути.
- Отсутствует научный консенсус относительно структуры Млечного Пути. Одни исследователи считают, что Галактика включает спиральные рукава [7, 35], тогда как другие предполагают наличие двухкомпонентного внешнего кольца $R_1 R_2$ [12, 36]. Это создает необходимость проведения новых исследований.
- Развитие вычислительной техники и современных методов численного моделирования открывает новые перспективы для проведения сложных численных исследований. Современные вычислительные ресурсы позволяют моделировать динамику звездного диска с высокой точностью, что в сочетании с повышением точности наблюдательных данных способствует созданию более реалистичных моделей Галактики.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы состоит в детальном изучении влияния бара на кинематику звезд в диске Галактики в широкой окрестности Солнца на основе численного моделирования и анализа данных *Gaia*.

В рамках поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Отбор качественных данных каталога *Gaia*: звезды с надежно измеренными параллаксами, точной астрометрией и измеренной лучевой скоростью;

2. Отбор и анализ подвыборки звезд вблизи плоскости диска Галактики;
3. Создание и тестирование численных моделей диска Галактики, хорошо воспроизводящих наблюдательные данные;
4. Сопоставление наблюдаемых кинематических характеристик с результатами моделирования; получение новых оценок параметров бара Галактики;
5. Выделение классов орбит, поддерживающих различные резонансные структуры, и исследование их свойств статистическими методами;
6. Исследование связи между временем роста бара и началом организованных колебаний орбит.

Научная новизна

1. Была построена новая численная модель Галактики, включающая потенциал бара, балджа, гало и экспоненциального диска. Модель хорошо воспроизводит распределение скоростей звезд диска вблизи OLR бара, полученное по данным *Gaia* DR3. Модель может быть легко модифицирована для решения большого круга задач.
2. Путем сравнения результатов моделирования с наблюдениями получены новые независимые оценки параметров галактического бара: угловой скорости вращения, позиционного угла и возраста. Полученные оценки согласуются с оценками других авторов.
3. Обнаружено, что резонансные кольца демонстрируют периодические изменения морфологии, выражающиеся в периодическом усилении то лидирующих, то отстающих сегментов колец.
4. Показано, что периодические изменения морфологии внешних колец поддерживаются качающимися орбитами, направление вытянутости которых совершает периодические колебания относительно большой оси бара.
5. Показано, что качающиеся орбиты также вызывают периодическое увеличение радиальной скорости в диапазоне галактоцентрических расстояний 6.0–7.0 кпк (формирование горба). Получена оценка возраста бара, учитывающая отсутствие этого горба в наблюдательном распределении скоростей.
6. Исследована зависимость момента начала колебаний качающихся орбит от времени роста бара. Обнаружено, что вне зависимости от времени роста бара, колебания орбит начинаются в момент, когда бар достигает силы $Q_b = 0.170$.

7. Показано, что в модельном диске формируется поток Геркулеса, аналогичный наблюдаемому. Показано, что область Геркулеса в модели представлена в основном звездами, находящимися на орбитах, поддерживающих внешнее резонансное кольцо R_1 .

Научная и практическая значимость

Полученные в ходе исследования результаты существенно расширяют представления о влиянии бара на кинематику звезд в широкой (3 кпк) окрестности Солнца. Научная значимость работы заключается в получении независимых оценок параметров галактического бара — его угловой скорости, позиционного угла и возраста, основанных на сопоставлении результатов моделирования с данными *Gaia* DR3.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная численная модель обладает высокой степенью модифицируемости и может быть адаптирована для анализа новых каталогов астрометрических данных (*Gaia* DR4 и последующих), а также данных спектроскопических обзоров. Кроме того, результаты могут быть применены при построении более точных моделей распределения масс в Галактике, что имеет значение для задач галактической динамики и интерпретации наблюдаемых движущихся групп в солнечной окрестности.

Методология и методы исследования

Исследование построено на сочетании численных методов и анализа наблюдательных данных. Сравнение моделей с наблюдениями позволяет определить оптимальное значение динамических параметров Галактики. Для решения поставленных задач был разработан ряд программ, предназначенных для моделирования движения тестовых частиц в составном гравитационном потенциале, а также для обработки результатов моделирования и наблюдательных данных. Динамические модели позволили проводить длительное численное интегрирование орбит и сравнивать модельные и наблюдательные распределения скоростей при различных значениях параметров компонентов Галактики.

В качестве наблюдательной основы были использованы данные астрометрической миссии *Gaia*. Были отобраны звезды с точными измерениями параллаксов, собственных движений и лучевых скоростей. На этой основе производилось вычисление пространственных и кинематических параметров звезд в галактоцентрической системе координат. Особое внимание уделялось отбору статистически однородных выборок и анализу влияния систематических эффектов и наблюдательных ошибок на результаты. Для интерпретации полученных результатов моделирования применялись методы статистического анализа.

Степень достоверности результатов

Работа опирается на общепринятые методы и теоретические подходы, представленные в рецензируемых научных статьях. Достоверность полученных наблюдательных результатов обеспечивается использованием данных космической миссии *Gaia*, которые в настоящее время являются одним из наиболее надежных и широко используемых источников информации о пространственных координатах и скоростях звезд Галактики. Обработка данных выполнялась с применением общепринятых методов статистики, широко представленных в современной научной литературе. Модели Галактики создавались на основе стандартных алгоритмов численного интегрирования и с учетом современных представлений о форме потенциалов компонентов Галактики. Там, где это возможно, полученные результаты сравнивались с опубликованными в рецензируемых журналах результатами исследований других авторов. Результаты данной работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, доклады по результатам работы были представлены на всероссийских научных конференциях.

Положения, выносимые на защиту

1. Динамическая модель Галактики с баром, вращающимся с угловой скоростью $\Omega_b = 55_{-3}^{+2}$ км/с/кпк, обеспечивает наилучшее соответствие наблюдениям, полученным по данным *Gaia* DR3.
2. Периодические изменения морфологии внешних резонансных колец, возникающих в диске модельной Галактики, поддерживаются качающимися орбитами, которые изменяют направление вытянутости относительно бара с периодом ~ 2 млрд лет. Качающиеся орбиты также вызывают периодическое увеличение радиальной скорости V_R на 1.90 ± 0.12 км/с в диапазоне галактоцентрических расстояний 6.0–7.0 кпк. Отсутствие такого «горба» на наблюдательных профилях, выведенных по данным *Gaia* DR3, дает оценку возраста галактического бара 2.0 ± 0.3 или 4.0 ± 0.5 млрд лет.
3. Существует кинематическая особенность распределения скоростей звезд модельного диска, которая отождествляется с потоком Геркулеса в реальном диске Галактики. Орбиты в модельной области Геркулеса поддерживают внешнее резонансное кольцо R_1 . В области, симметричной области Геркулеса относительно линии $V_R = 0$ (область «анти-Геркулеса»), большая часть орбит поддерживает кольцо R_2 .

4. Колебания орбит вблизи внешнего линдбладовского резонанса бара начинаются с достижения баром 54% от максимальной силы, что соответствует силе бара $Q_b = 0.17 \pm 0.02$.

Апробация результатов

Результаты, отраженные в настоящей диссертации, представлены в следующих докладах на конференциях:

1. Всероссийская астрономическая конференция «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, 23–28 августа 2021, устный доклад «Влияние бара на кинематику звезд диска Галактики вблизи внешнего линдбладовского резонанса бара. Сравнение с данными *Gaia* EDR3» (23 августа 2021)
2. Ломоносовские чтения 2022. Секция астрономии и геофизики, ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, 21 апреля 2022, соавтор устного доклада «Влияние бара на кинематику звезд диска Галактики по данным *Gaia* EDR3»
3. Ломоносовские чтения 2024. Секция астрономии, ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, 21 марта 2024, соавтор устного доклада «Периодические изменения морфологии галактических резонансных колец и возраст галактического бара»
4. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2024 «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр», САО РАН (п. Нижний Архыз Карачаево-Черкесской республики), Россия, 25–31 августа 2024, устный доклад «Периодические изменения ориентации орбит и возраст галактического бара» (29 августа 2024)
5. Всероссийская астрономическая конференция «Современная астрономия: наука и образование (к 270-летию Московского университета)», ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, 23–27 июня 2025, соавтор устного доклада «Поток Геркулеса и резонансные эллиптические кольца R_1 и R_2 » (25 июня 2025)
6. Всероссийская астрономическая конференция «Современная астрономия: наука и образование (к 270-летию Московского университета)», ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, 23–27 июня 2025, устный доклад «Старт колебаний орбит и время роста бара» (25 июня 2025)

Личный вклад автора

Результаты диссертационной работы опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Автор принимал непосредственное участие во всех этапах выполненных исследований — от постановки задачи и разработки методологии до анализа результатов, работы с текстами статей и подготовки докладов на конференциях. Автор участвовал в разработке общей концепции исследования, обсуждении методов решений и интерпретации полученных результатов. Вклад автора включает как теоретические исследования, так и разработку вычислительных и аналитических инструментов, проведение полного цикла обработки и интерпретации данных наблюдений и подготовку публикаций.

Автор принимал участие в разработке модели Галактики, включающей аналитический потенциал бара Феррера, и в ее дальнейшей модификации. Автором выполнялось интегрирование орбит звезд, проводилось сравнение наблюдательных и модельных данных. Автором формировались критерии, позволяющие выделить классы орбит, создающих те или иные кинематические особенности вблизи резонансов. Часть вычислительных экспериментов выполнена автором.

В Работах №1 (личный вклад 25%) и №2 (личный вклад 35%) автором были выполнены проверки результатов всех этапов исследования, проведена часть моделирования и обработки результатов, а также сопоставление наблюдательных и модельных результатов. В Работе №3 (личный вклад 50%) автор принимал участие в разработке и проверке гипотез о критериях отбора выборки звезд, создающих горбы в модели. Автором была получена и обработана выборка звезд *Gaia* DR3, включая отбор объектов, преобразование координат, пересчет скоростей; а также оценка систематических эффектов. В Работе №4 (личный вклад 50%) автором проводилась работа с данными *Gaia* и других каталогов, содержащих данные о металличности звезд, выдвижение и проверка гипотез, проводилось моделирование и сравнение наблюдательных и модельных данных.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы с 54 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 148 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** описывается современное состояние исследований кинематики Галактики, приводятся краткий исторический обзор и основные теоретические положения, а также указываются противоречия и ограничения существующих подходов к изучению Галактики. Описывается актуальность выбранной темы, формулируется цель диссертационной работы. Обосновывается научная новизна работы, дается характеристика методов исследования и проводится оценка достоверности результатов. Приводится список публикаций в рецензируемых журналах, содержащих основные результаты работы, а также конференций, на которых были представлены эти результаты; оценивается личный вклад автора в результаты. Формулируются положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена описанию методов исследования. В ней подробно изложено построение модели галактического диска, методы численного моделирования и обработки полученных результатов. Построенная модель также используется в последующих главах диссертации. Подробно рассматриваются методы получения и обработки данных *Gaia*, формирования выборок звезд и вычисления наблюдательных распределений скоростей. Разработанный подход с необходимыми модификациями используется и при получении результатов, представленных в последующих главах диссертации. Рассматривается формирование резонансных колец в модельном диске, а также проводится сравнение наблюдательных и модельных распределений скоростей, на основании которого получены оценки ряда динамических параметров бара, включая его возраст, угловую скорость вращения и позиционный угол относительно Солнца. Угловая скорость вращения бара $\Omega_b = 55^{+2}_{-3}$ км/с/кпк обеспечивает наилучшее согласие модели и наблюдений. Отдельное внимание уделено влиянию значения галактоцентрического расстояния Солнца на получаемые оценки и сравнительному анализу результатов, полученных с использованием данных *Gaia* EDR3 и *Gaia* DR3, рассматривается процедура коррекции расстояний *Gaia*.

Глава 2 посвящена исследованию периодических изменений морфологии резонансных колец, формирующихся в диске модельной Галактики. Подробно анализируются распределения плотности звезд в модельном диске в различные моменты времени. Определяются периоды изменения морфологии внешних резонансных колец. Обнаружено попеременное усиление то лидирующих, то отстающих сегментов внешних колец. Для количественного описания этих изменений применяется фурье-анализ распределения плотности звезд, позволяющий определить характерные периоды колебаний и проследить их связь с динамикой орбит вблизи резонансов бара. Обсуждаются орбиты, поддерживающие изменения морфологии резонансных колец. Определяется период колебаний направления вытянутости орбит вблизи OLR. Показано, что период колебаний орбит вблизи OLR совпадает с периодом изменения

морфологии резонансных колец (≈ 2 млрд лет).

Глава 3 посвящена исследованию периодического увеличения радиальной скорости вблизи внешнего линдбладовского резонанса в модели Галактики, описанной в Главе 1. Рассматривается периодическое возрастание радиальной скорости V_R на 1.90 ± 0.12 км/с в диапазоне галактоцентрических расстояний $R = 6-7$ кпк, проявляющееся в виде появления характерного горба. Горб возникает с периодом порядка 2 млрд лет, близким к периоду колебаний направления вытянутости орбит вблизи OLR, полученным в Главе 2. Подробно описываются критерии формирования выборки звезд, поддерживающих горбы, и приводятся примеры соответствующих орбит. Приводятся статистические данные об орбитах вблизи внешнего линдбладовского резонанса: порядок симметрии, средняя ориентация, а также распределение орбит на плоскости (E_J, P) , где E_J — интеграл Якоби, а P — период колебаний. Отдельное внимание уделено оценке вклада качающихся орбит в формирование горбов. Продемонстрировано, что при исключении отобранных звезд горбы исчезают. На основании сравнения наблюдательных и модельных распределений радиальных скоростей получены оценки возраста бара: 2.0 ± 0.3 или 4.0 ± 0.5 млрд лет.

В **Главе 4** продолжено исследование качающихся орбит: определяется момент начала колебаний орбит, поддерживавших горбы. Колебания качающихся орбит начинаются не одновременно со стартом моделирования, а позже. Поскольку бар в процессе моделирования включается постепенно, были построены дополнительные модели, различающиеся только временем роста бара. Исследованы зависимости радиальной скорости от времени в разных моделях, проведена их аппроксимация затухающими колебаниями. Показано, что при сдвиге всех зависимостей по времени на величину, пропорциональную времени роста бара с коэффициентом 0.54, колебания орбит происходят синхронно во всех моделях. Исследованы также другие факторы, влияющие на значение коэффициента сдвига. Показано, что момент старта колебаний направления вытянутости орбит не зависит от времени роста бара. Определено значение силы бара, при которой начинаются согласованные колебания орбит, равное $Q_b \approx 0.17$, что лишь незначительно меньше величины $Q_b = 0.25$, принятой в качестве условной границы между слабыми и сильными барами.

В **Главе 5** исследуется поток Геркулеса, возникающий как в модельной, так и в наблюдательной выборке. Показано, что на плоскости (V_R, V_T) поток Геркулеса наблюдается не во все моменты времени. Установлено, что число звезд в области Геркулеса и области «анти-Геркулеса», расположенной симметрично области Геркулеса относительно линии $V_R = 0$, изменяется со временем по-разному. Для области анти-Геркулеса обнаружены периодические изменения с характерным периодом около 1.8 млрд лет, что согласуется с ранее выявленным периодом порядка 2 млрд лет. Исследованы орбиты звезд в двух областях: начальные параметры, периоды, ори-

ентация и морфология. Показано, что в области Геркулеса преобладают орбиты, поддерживающие внешнее кольцо R_1 , а в области анти-Геркулеса — поддерживающие кольцо R_2 . Проводится сравнение модельных и наблюдательных данных, подробно обсуждаются эффекты селекции в данных *Gaia*.

В **Заключении** представлены главные результаты работы, основные выводы и перспективы дальнейших исследований. Отмечается, что многие особенности кинематики звезд в окрестности Солнца могут рассматриваться как прямое следствие резонансной настройки орбит вблизи OLR. В рамках выбранной постановки задачи галактический бар выступает основным источником неосесимметричных возмущений. Подчеркивается, что при таком подходе отсутствует необходимость вводить долгоживущий спиральный узор в качестве основного механизма формирования наблюдаемых кинематических особенностей. Напротив, значительная часть структуры естественным образом возникает как резонансный отклик на вращающееся неосесимметричное возмущение, создаваемое баром. Также рассматриваются направления дальнейшей работы, связанные как с анализом новых данных *Gaia* DR4 и получением на их основе новых оценок параметров бара, так и с развитием модели. В частности, обсуждаются перспективы перехода к трехмерным моделям, подчеркивается важность изучения влияния параметров бара на характерные периоды колебаний орбит вблизи OLR.

Заключение

В диссертационной работе исследовано влияние бара на кинематику звезд диска Галактики в окрестности внешнего линдбладовского резонанса (OLR). Основная задача состояла в том, чтобы связать наблюдаемые по данным *Gaia* особенности распределений скоростей в солнечной окрестности с конкретными динамическими механизмами. При этом классическое описание крупномасштабной структуры Галактики как стационарного спирального узора сталкивается с рядом трудностей, главная из которых состоит в том, что бар и спиральный узор должны вращаться с разной угловой скоростью.

Основная идея работы состоит в том, что многие особенности кинематики в окрестности Солнца являются следствием резонансной настройки орбит вблизи OLR. Бар выступает главным источником неосесимметричных возмущений: он формирует семейства периодических и квазипериодических орбит, поддерживающих двойное внешнее кольцо R_1R_2 и характерные особенности профилей скоростей.

В рамках диссертации получены следующие результаты:

1. Построена динамическая модель Галактики с аналитическим баром, позволяющая сопоставлять расчетные профили радиальной и азимутальной скоростей

с наблюдательными данными *Gaia* DR3 и использовать форму этих профилей для определения параметров бара.

2. По результатам сравнения модельных и наблюдательных профилей получены ограничения на параметры бара. Наилучшее согласие достигается при угловой скорости вращения бара $\Omega_b = 55_{-3}^{+2}$ км/с/кпк. Для позиционного угла бара получена оценка $\theta_b = 45_{-20}^{+15^\circ}$.
3. Выявлен механизм периодических изменений морфологии внешних резонансных колец. Показано, что вблизи OLR существует популяция «качающихся» орбит, для которых характерны периодические изменения направления вытянутости относительно большой оси бара. Период этих колебаний составляет ~ 2 млрд лет; тот же временной масштаб проявляется в изменениях поверхностной плотности звезд во внешних кольцах R_1 и R_2 .
4. Исследована природа «горбов» на профилях радиальной скорости. Показано, что они поддерживаются небольшой выборкой звезд, связанных с качающимися орбитами. Поскольку наблюдательный профиль *Gaia* DR3 не демонстрирует выраженного горба, это позволяет оценить наиболее вероятные значения возраста бара: $T_b = 2.0 \pm 0.3$ или $T_b = 4.0 \pm 0.5$ млрд лет.
5. Определен момент старта организованных колебаний направления вытянутости орбит и получена оценка критической силы бара, необходимой для их возникновения. Колебания начинаются, когда бар достигает примерно половины своей максимальной силы, что соответствует значению $Q_b \approx 0.17$.
6. Показано, что в модельном диске формируется движущаяся группа, соответствующая потоку Геркулеса. Она представлена преимущественно звездами на эллиптических орбитах, вытянутых перпендикулярно бару и поддерживающих внешнее кольцо R_1 . В области «анти-Геркулеса» доминируют орбиты, вытянутые параллельно бару и поддерживающие кольцо R_2 .

Полученные результаты важны для понимания динамики Галактики в целом. Они уточняют параметры бара и сужают допустимый диапазон моделей, а также показывают, что локальные кинематические особенности, выявленные миссией *Gaia* в солнечной окрестности, могут быть проявлением резонансной настройки орбит, вызванной баром.

Дальнейшее развитие работы связано, во-первых, с исследованием физической природы характерного временного масштаба порядка 2 млрд лет, неоднократно появлявшегося в результатах исследования. Планируется определить, какие параметры Галактики задают этот период, прежде всего, проверить его связь с массой, силой и формой бара.

Во-вторых, важной перспективой является переход от плоских к трехмерным динамическим моделям. Такая постановка позволит сравнивать результаты с наблюдениями не только в плоскости диска, но и с учетом вертикальной структуры Галактики, а также проверить, возникают ли в модели признаки влияния бара, проявляющиеся в вертикальном направлении.

Наконец, выход каталога *Gaia* DR4 должен существенно расширить объем доступной информации и улучшить статистику в окрестности OLR. Разработанная модель может быть легко адаптирована к новой выборке, что создает основу для более точного определения угловой скорости, позиционного угла, силы и возраста бара, а также выявить новые особенности кинематики в области OLR.

Публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. Melnik, A.M., Dambis, A.K., **Podzolkova, E.N.**, Berdnikov, L.N. Influence of the Galactic bar on the kinematics of the disc stars with Gaia EDR3 data // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — Vol. 507, № 3. — pp. 4409–4424. EDN: VJTYNC. Импакт-фактор 1.03 (JCI). Личный вклад 25%. Объем 1.60 печатных листов.
2. Melnik, A.M., **Podzolkova, E.N.**, Dambis, A.K. Periodic changes in the morphology of the Galactic resonance rings // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2023. — Vol. 525, № 3. — pp. 3287–3305. EDN: RJOEDO. Импакт-фактор 1.03 (JCI). Личный вклад 35%. Объем 2.18 печатных листов.
3. Мельник, А.М., **Подзолкова, Е.Н.** Горбы на профилях распределения радиальных скоростей и возраст галактического бара // Письма в Астрономический журнал. — 2024. — Т. 50, № 8. — С. 513–533. EDN: LYCZWF. Импакт-фактор 0.791 (РИНЦ). Личный вклад 50%. Объем 1.94 печатных листов.
Melnik, A. M., **Podzolkova, E. N.** Humps on the profiles of the radial-velocity distribution and the age of the Galactic bar // Astronomy Letters. — 2024. — Vol. 50, № 8. — pp. 481–501. EDN: QKFSJH. Импакт-фактор 0.20 (JCI). Личный вклад 50%. Объем 1.92 печатных листов.
4. Мельник, А.М., **Подзолкова, Е.Н.** Поток Геркулеса и внешнее эллиптическое кольцо R1R2 // Астрофизический бюллетень. — 2025. — Т. 80, № 2. — С. 263–283. EDN: SHQWTJ. Импакт-фактор 0.790 (РИНЦ). Личный вклад 50%. Объем 1.93 печатных листов.
Melnik, A.M., **Podzolkova, E.N.** Hercules stream and the outer elliptical ring R1R2

// Astrophysical Bulletin. — 2025. — Vol. 80, № 2. — pp. 254–273. EDN: GYCNIZ.
Импакт-фактор 0.31 (JCI). Личный вклад 50%. Объем 1.93 печатных листов.

Список литературы

- [1] Gaia Data Release 2. Mapping the Milky Way disc kinematics // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — v. 616. — p. A11.
- [2] Gaia Early Data Release 3. The astrometric solution // *Astronomy and Astrophysics*. — 2021. — v. 649. — p. A2.
- [3] Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties // *Astronomy and Astrophysics*. — 2023. — v. 674. — p. A1.
- [4] *Dehnen W.* The Effect of the Outer Lindblad Resonance of the Galactic Bar on the Local Stellar Velocity Distribution // *The Astronomical Journal*. — 2000. — v. 119. — pp. 800–812.
- [5] *Bovy J.* Tracing the Hercules Stream Around the Galaxy // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — v. 725. — pp. 1676–1681.
- [6] *Morgan W. W., Whitford A. E., Code A. D.* Studies in Galactic Structure. I. A Preliminary Determination of the Space Distribution of the Blue Giants // *The Astrophysical Journal*. — 1953. — v. 118. — p. 318.
- [7] *Russeil D.* Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — v. 397. — pp. 133–146.
- [8] *Lin C. C., Shu F. H.* On the Spiral Structure of Disk Galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 1964. — v. 140. — p. 646.
- [9] *Toomre A.* Group Velocity of Spiral Waves in Galactic Disks // *The Astrophysical Journal*. — 1969. — v. 158. — p. 899.
- [10] *Mark J. W.-K.* On density waves in galaxies. IV. Wave amplification through processes that remove angular momentum from galactic disks // *The Astrophysical Journal*. — 1976. — v. 206. — pp. 418–434.
- [11] *Toomre A.* What amplifies the spirals // *Structure and Evolution of Normal Galaxies* / Ed. by S. M. Fall, D. Lynden-Bell. — 1981. — pp. 111–136.
- [12] *Melnik A. M., Rautiainen P.* Kinematics of the outer pseudorings and the spiral structure of the Galaxy // *Astronomy Letters*. — 2009. — v. 35. — pp. 609–624.

- [13] *Melnik A. M.* Galactic resonance rings: modelling of motions in the wide solar neighbourhood // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — v. 485. — pp. 2106–2124.
- [14] *Kalnajs A. J.* Pattern Speeds of Density Waves // *Dynamics of Disc Galaxies* / Ed. by B. Sundelius. — 1991. — p. 323.
- [15] *Eskridge P. B., Frogel J. A., Pogge R. W., Quillen A. C., Davies R. L., DePoy D. L., Houdashelt M. L., Kuchinski L. E., Ramírez S. V., Sellgren K., Terndrup D. M., Tiede G. P.* The Frequency of Barred Spiral Galaxies in the Near-Infrared // *The Astronomical Journal*. — 2000. — v. 119. — pp. 536–544.
- [16] *Kormendy J., Kennicutt Jr. R. C.* Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — v. 42. — pp. 603–683.
- [17] *Gerhard O.* Pattern speeds in the Milky Way // *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*. — 2011. — v. 18. — p. 185.
- [18] *Pettitt A. R., Dobbs C. L., Acreman D. M., Price D. J.* The morphology of the Milky Way - I. Reconstructing CO maps from simulations in fixed potentials // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — v. 444. — pp. 919–941.
- [19] *Dwek E., Arendt R. G., Hauser M. G., Kelsall T., Lisse C. M., Moseley S. H., Silverberg R. F., Sodroski T. J., Weiland J. L.* Morphology, Near-Infrared Luminosity, and Mass of the Galactic Bulge from COBE DIRBE Observations // *The Astrophysical Journal*. — 1995. — v. 445. — p. 716.
- [20] *Churchwell E., Babler B. L., Meade M. R., Whitney B. A., Benjamin R., Indebetouw R., Cyganowski C., Robitaille T. P., Povich M., Watson C., Bracker S.* The Spitzer/GLIMPSE Surveys: A New View of the Milky Way // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2009. — v. 121. — p. 213.
- [21] *González-Fernández C., López-Corredoira M., Amôres E. B., Minniti D., Lucas P., Toledo I.* The long bar as seen by the VVV survey. I. Colour-magnitude diagrams // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — v. 546. — p. A107.
- [22] *Athanassoula E., Bienayme O., Martinet L., Pfenniger D.* Orbits as building blocks of a barred galaxy model // *Astronomy and Astrophysics*. — 1983. — v. 127. — pp. 349–360.
- [23] *Contopoulos G., Grosbol P.* Orbits in barred galaxies // *Astronomy and Astrophysics Review*. — 1989. — v. 1. — pp. 261–289.

- [24] *Athanassoula E.* Morphology of bar orbits // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1992. — v. 259. — pp. 328–344.
- [25] *Weinberg M. D.* Kinematic Signature of a Rotating Bar near a Resonance // *The Astrophysical Journal*. — 1994. — v. 420. — p. 597.
- [26] *Ness M., Lang D.* The X-shaped Bulge of the Milky Way Revealed by WISE // *The Astronomical Journal*. — 2016. — v. 152. — p. 14.
- [27] *Minchev I., Nordhaus J., Quillen A. C.* New Constraints on the Galactic Bar // *The Astrophysical Journal*. — 2007. — v. 664. — pp. L31–L34.
- [28] *Bobylev V. V., Bajkova A. T.* Hercules and Wolf 630 stellar streams and galactic bar kinematics // *Astronomy Letters*. — 2016. — v. 42. — pp. 228–239.
- [29] *Monari G., Famaey B., Siebert A., Duchateau A., Lorscheider T., Bienaymé O.* Staying away from the bar: the local dynamical signature of slow and fast bars in the Milky Way // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — v. 465. — pp. 1443–1453.
- [30] *Melnik A. M., Dambis A. K., Podzolkova E. N., Berdnikov L. N.* Influence of the Galactic bar on the kinematics of the disc stars with Gaia EDR3 data // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — v. 507. — pp. 4409–4424.
- [31] *Asano T., Fujii M. S., Baba J., Bédorf J., Sellentin E., Portegies Zwart S.* Impact of bar resonances in the velocity-space distribution of the solar neighbourhood stars in a self-consistent N-body Galactic disc simulation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — v. 514. — pp. 460–469.
- [32] *Cole A. A., Weinberg M. D.* An Upper Limit to the Age of the Galactic Bar // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — v. 574. — pp. L43–L46.
- [33] *Gaia Data Release 3.* Properties and validation of the radial velocities // *Astronomy and Astrophysics*. — 2023. — v. 674. — p. A5.
- [34] *Efremov Y. N., Sitnik T. G.* Young Galactic Star - Gas Complexes // *Soviet Astronomy Letters*. — 1988. — v. 14. — p. 347.
- [35] *Bobylev V. V., Bajkova A. T.* The Milky Way spiral structure parameters from data on masers and selected open clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — v. 437. — pp. 1549–1553.

- [36] *Romero-Gómez M., Athanassoula E., Antoja T., Figueras F.* Modelling the inner disc of the Milky Way with manifolds - I. A first step // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — v. 418. — pp. 1176–1193.