

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга

На правах рукописи

МЕЛЬНИК АННА МАРАТОВНА
**КИНЕМАТИКА ВНЕШНИХ ПСЕВДОКОЛЕЦ И
СПИРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ**

Специальность: 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва - 2011

Работа выполнена в отделе изучения Галактики и переменных звезд Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук
профессор Корчагин Владимир Иванович
(Научно-исследовательский институт физики
Южный Федеральный Университет)

Доктор физико-математических наук
Бобылев Вадим Вадимович
(Главная астрономическая обсерватория РАН
Пулково)

Доктор физико-математических наук
Сильченко Ольга Касьяновна
(отдел Физики эмиссионных звезд и галактик
Государственного астрономического института
им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова)

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет

Защита состоится 07 апреля 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного Совета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, шифр Д501.001.86.

Адрес: 119991, Москва, Университетский проспект, 13, ГАИШ МГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга МГУ (Москва, Университетский проспект, 13, ГАИШ МГУ).

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук _____ С.О.Алексеев

Актуальность работы

К концу 1990-х г. накопилось много данных, указывающих на присутствие бара в Галактике (Блиц и др., 1993). Первоначально размер бара оценивался на уровне $R_{bar} \approx 2-3$ кпк, но на сегодняшний день оценки его полудлины увеличились до $R_{bar} = 3-5$ кпк. Некоторые исследователи считают, что радиус коротации бара расположен на расстояниях $R = 3-4$ кпк (Инглмайер и Герхард, 1999; Хэбин и др., 2006; и ссылки в этих работах), тогда как другие полагают, что Галактика имеет более длинный бар с большой полуосью $a = 4-5$ кпк (Вейнер и Селвуд, 1999; Бенжамин и др., 2005; Кабрера-Лаверс и др., 2007; и ссылки в этих работах). Большое количество данных свидетельствует, что большая ось бара ориентирована в направлении $\theta_b = 15-45^\circ$ так, что ближайший к Солнцу конец бара находится в первом квадранте (Блиц, 1993; Вейнер и Селвуд, 1999; Бенжамин и др., 2005; Инглмайер, Герхард, 2006; Кабрера-Лаверс и др., 2007). Различия в оценке позиционного угла бара (галактоцентрический угол между большой осью бара и направлением на Солнце) могут указывать на то, что внутренняя часть бара в действительности является трехосным балджем (Кабрера-Лаверс и др., 2007). С другой стороны, такая неопределенность может быть частично вызвана нашим неблагоприятным положением рядом с плоскостью диска, которое затрудняет изучение многих аспектов галактической морфологии.

Что касается спирального узора Галактики, то предлагаемые модели и схемы содержат от 2 до 6 спиральных рукавов (обзоры Валле 2005, 2008 и новые работы: Хоу и др., 2009; Рейд, Ментен, Женг и др., 2009; Ефремов, 2011). Также рассматривается возможность, что двухрукавная спиральная структура доминирует в старом звездном диске, а черырехрукавный спиральный узор – в молодом населении диска, включающем газ и молодые звезды (Дриммел 2000; Лепин и др., 2001; Чечвел и др., 2009). В допол-

нение к спиральным дискам может включать внутреннее кольцо или псевдокольцо, окружающее бар, которое проявляется в виде так называемого “трехкилопарсекового” спирального рукава (Дейм и Таддеуш, 2008; Чечвел и др., 2009). Кроме того, выдвинута гипотеза о существовании ядерного кольца с большой полуосью 1.5 кпк в Галактике (Родригез-Фернандез и Ком, 2008). Различные типы колец: ядерные, внутренние и внешние – часто наблюдаются в дисковых галактиках, особенно в галактиках с барами (Бута и Ком, 1996). Таким образом, присутствие внешнего кольца в Галактике также возможно (Калнайс, 1991).

Бута (1995) проделал огромную работу по классификации галактических кольцевых структур. Его каталог южных кольцевых галактик (Catalog of Southern Ringed Galaxies) содержит более 2050 галактик, имеющих какие-либо детали внешних колец, из которых 42% (860 объектов) классифицированы как кольца или псевдокольца (разомкнутые кольца) резонансного типа. Далее мы будем интересоваться только резонансными кольцами. Моделирование показало, что внешние кольца/псевдокольца обычно лежат вблизи внешнего линдбладовского резонанса бара (OLR), тогда как внутренние кольца находятся вблизи внутреннего резонанса 4/1, а ядерные кольца – вблизи внутреннего линдбладовского резонанса (ILR) (Шварц, 1981; Берд и др., 1994; Раутиайнен и Сало, 1999, 2000). Положение резонансов в диске определяется отношением эпициклической частоты κ и угловой скорости движения звезд по орбите относительно бара $\Omega(R) - \Omega_b$, где $\Omega(R)$ – угловая скорость кругового вращения на данном расстоянии, а Ω_b – угловая скорость бара. На расстояниях OLR и ILR, а также в областях резонансов более высокого порядка должны выполняться следующие условия:

$$\frac{\kappa(R)}{\Omega(R) - \Omega_b} = 2/1 \quad (ILR),$$

$$\frac{\kappa(R)}{\Omega(R) - \Omega_b} = 4/1 \quad (4/1),$$

$$\frac{\kappa(R)}{\Omega(R) - \Omega_b} = -4/1 \quad (-4/1),$$

$$\frac{\kappa(R)}{\Omega(R) - \Omega_b} = -2/1 \quad (OLR),$$

(Контопулос и Гросбол, 1989; Бинни и Тремейн, 2008). Очевидно, что резонансы $\pm 4/1$ находятся ближе к радиусу коротации (CR), чем линдбладовские резонансы ($\pm 2/1$).

Внешние кольца обычно наблюдаются в галактиках ранних типов. Среди галактик с малым красным смещением частота появления внешних колец составляет 10% от всех типов спиральных галактик. Но для ранних типов она увеличивается до 20% (Бута и Ком, 1996). Выделяются два основных класса внешних колец и псевдоколец: кольца R_1 (псевдокольца R'_1), вытянутые перпендикулярно бару, и кольца R_2 (псевдокольца R'_2), вытянутые параллельно бару. В дополнении существует смешанный морфологический тип $R_1R'_2$, который демонстрирует элементы обоих классов. Исследование Буты (1995) показало следующее распределение по основным типам внешних колец: 18% (R_1), 37% (R'_1), меньше 1% (R_2), 35% (R'_2) и 9% ($R_1R'_2$). Кольца R_1 часто демонстрируют “ямочки” около концов бара. Существует также большое количество колец/псевдоколец, которые не могут быть отнесены к перечисленным классам из-за неопределенности их морфологических характеристик или наклона, мешающего детальной классификации (Бута, 1995; Бута и Крокер, 1991; Бута и др., 2007). Малая доля правильных колец R_2 может быть вызвана эффектами селекции – они лишены заметных особенностей, например, “ямочек”, поэтому их точная классификация может быть затруднена неопределенностью в ориентации.

Для нашего исследования важное значение имеет положение OLR бара в Галактике. Плоская кривая вращения дает следующее

соотношение между радиусом коротации и радиусом OLR:

$$R_{OLR} = \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) R_{CR} \quad (1)$$

Хотя угловая скорость бара определяется из наблюдений плохо, но положение его радиуса коротации в пределах $R_{CR} = 3.5\text{--}5$ кпк соответствует положению OLR в диапазоне $R_{OLR} = 6\text{--}8.5$ кпк и угловой скорости бара $\Omega_b = 42\text{--}60$ км/с/кпк. Таким образом, OLR бара в Галактике должен лежать в окрестности Солнца: $|R_{OLR} - R_0| < 1.5$ кпк. На это также указывают исследования Калнайса (1991), Инглмайера и Герхарда (1999), Вейнера и Селвуда (1999), Денена (2000), Фукса (2001), Чакрабарти (2007), Минчева и др. (2009), а также Герхарда (2010). Поэтому попытка связать систематические движения молодых звезд в окрестности Солнца с присутствием внешних колец является **актуальной задачей**.

Было предпринято много попыток построить динамическую модель спирального узора Галактики. Первая удачная аналитическая модель была получена Лином, Шу, и Юанем (1969). Они предложили двухрукавную модель спирального узора с углом закрутки спиральных рукавов (угол между касательной к рукаву и касательной к окружности в данной точке) $i = 6^\circ$ и угловой скоростью вращения спирального узора $\Omega_p = 13.5$ км/с/кпк. Эта модель имела много наблюдательных приложений, главное из которых – это объяснение кинематики молодых объектов в области Персея (Робертс, 1972; Бертон, Баниа, 1974; Бранд, Блиц, 1993; Мельник, 2003; Ситник, 2003).

Работы Робертса и его коллег (Робертс, 1969, 1972; Робертс и Юань, 1970) открывают эпоху численного моделирования спиральной структуры Галактики. Их модели учитывают влияние ударных волн на движение газовых частиц. Более поздние работы (Робертс и Хосман, 1984; Робертс и Стюарт, 1987) посвящены исследованию движения молекулярных облаков в возмущенном

потенциале Галактики. Они убедительно показали, что неупругие столкновения между облаками приводят к резкому увеличению их концентрации в узкой полосе, расположенной вблизи минимума потенциала – явление, эквивалентное ударному фронту в газовой среде.

Наблюдения в ближнем инфракрасном диапазоне впервые предоставили прямые доказательства существования бара в Галактике. Эксперимент *DIRBE* (Diffuse Infrared Background Experiment), проведенный на спутнике *COBE* (Cosmic Background Explorer), дал новый толчок построению динамических моделей Галактики. Две работы заслуживают особого внимания. Инглмайер и Герхард (1999), а также Вейнер и Селвуд (1999) построили динамические модели газовой среды, движущейся в галактическом потенциале, возмущенном баром. Обеим группам удалось воспроизвести так называемые “параллелограммы” на диаграммах долгота-скорость в центральной области Галактики $|l| < 5^\circ$. Диаграммы долгота-скорость демонстрируют распределение скоростей газа V_{LSR} (лучевые скорости, исправленные за движение Солнца к апексу) вдоль галактической долготы l , усредненное в некотором диапазоне галактических широт b . В подходе двух групп есть некоторые отличия: различные гидродинамические коды и различные аналитические выражения для потенциала бара. Вейнер и Селвуд (1999) нашли, что наилучшее согласие модельных и наблюдаемых (l, V_{LSR}) -диаграмм HI и CO в области $(-11 < l < 13^\circ)$ соответствует позиционному углу бара $\theta_b = 35 \pm 5^\circ$, вращающемуся с угловой скоростью $\Omega_b = 42$ км/с/кпк. Их модель включает достаточно длинный бар с большой полуосью $a = 3.6$ кпк, радиус коротации которого лежит на расстоянии $R_{CR} = 4.6$ кпк. Инглмайер и Герхард (1999) показали, что наилучшее согласие с наблюдаемыми (l, V_{LSR}) -диаграммами CO в области долгот $|l| < 60^\circ$ дают следующие параметры модели: $\Omega_b = 60$ км/с/кпк, $R_{CR} = 3.5 \pm 0.5$ кпк. Обе работы оказали большое влияние на моделирование диска Галактики.

В последнее десятилетие стало очевидным, что для объяснения поведения газа в центральной области и на периферии Галактики необходимо присутствие в диске как минимум двух узоров или двух мод, вращающихся с разной угловой скоростью. Быстро вращающийся бар ($\Omega_b = 60\text{--}40$ км/с/кпк) и связанный с ним внутренний спиральный узор могли бы объяснить кинематику молодых объектов во внутренней области, а медленный спиральный узор ($\Omega_{sp} = 10\text{--}25$ км/с/кпк) – кинематику молодых звезд и газа вне солнечного круга (Мельник, 2006). Биссанз, Инглмайер и Герхард (2003), развивая модель Инглмайера и Герхарда (1999), добавили к бару медленный спиральный узор ($\Omega_{sp} = 20$ км/с/кпк), но сравнение с наблюдениями опять ограничило внутреннюю область Галактики $10 < |l| < 50^\circ$, игнорируя область Персея ($l = 104\text{--}135^\circ$), расположенную вне солнечного круга.

Применить к Галактике двух-модную модель оказалось гораздо сложнее, чем ожидалось. С одной стороны, существует много моделей, где помимо бара в диске формируется узор, вращающийся медленнее, чем бар (Селвуд и Спарк, 1988; Массет и Таггер, 1997; Раутиайнен и Сало, 1999, 2000). С другой стороны, радиус коротации медленного узора лежит внутри OLR бара и медленный узор не доминирует внутри своего круга коротации. Другими словами, медленный узор вращается все же недостаточно медленно ($\Omega_{sp} \approx 30$ км/с/кпк, Глава 4), чтобы объяснить кинематику молодых звезд в области Персея.

Отметим другое важное направление в исследовании спиральной структуры Галактики – изучение распределения индикаторов спиральных рукавов по галактическому диску. Жоржелин и Жоржелин (1976), опираясь на распределение 100 HII областей – газовых облаков, ионизованных молодыми горячими звездами, – предложили четырехрукавный спиральный узор со средним углом закрутки спиральных рукавов 12° . Их модель является наиболее популярной и по сей день (см. обзоры Валле, 2005, 2008).

Она оказалась такой удачной еще и потому, что хорошо объясняет существование так называемых тангенциальных направлений, которые соответствуют максимумам в тепловом излучении радио-континуума, эмиссии HI и CO и ассоциируются с направлениями, касательными к спиральным рукавам.

В диссертации показано, что модель Галактики с внешним кольцом класса $R_1R'_2$ позволяет без привлечения медленных спиральных мод объяснить остаточные скорости в области Персея, а двухкомпонентное внешнее кольцо воспроизводит многие крупномасштабные морфологические особенности спиральной структуры Галактики.

Цели работы

- Исследование поля пространственных скоростей молодых звезд. Анализ систематических движений.
- Построение динамических моделей, воспроизводящих наблюдаемые остаточные скорости молодых звезд в окрестности 3 кпк от Солнца. Получение информации о структуре Галактики путем сравнения наблюдаемых и модельных скоростей.

Научная новизна

- Впервые представлен каталог лучевых скоростей и собственных движений OB-ассоциаций, исследовано поле пространственных скоростей, выявлены систематические движения OB звезд в окрестности 3 кпк от Солнца.
- Впервые исследована кинематика внешних колец и псевдоколец. Предложено объяснение резонансной кинематики. Исследован процесс формирования внешних колец в серии моделей с различной массой бара.

- Впервые построены динамические модели Галактики (модели с аналитическими барами), которые воспроизводят кинематику молодых звезд в областях Персея и Стрельца. Эти модели удовлетворяют широкому набору наблюдательных ограничений (плоская кривая вращения, длина и ориентация бара).
- Впервые построены N-body модели Галактики, которые воспроизводят кинематику молодых звезд в областях Персея, Стрельца и Местной системе. Исследованы биения между бар-модой и самой сильной из медленных мод в окрестности OLR бара. Исследована периодичность в колебаниях плотности и скорости на периферии галактических дисков.
- Впервые представлена спирально-кольцевая модель Галактики.

Научная и практическая значимость результатов работы

Результаты данной работы могут быть использованы для:

- построения динамических моделей Галактики;
- исследования распределения газа в плоскости Галактики, в том числе процессов накопления газа в центральной области и истечения газа на периферию;
- исследования структуры Галактики (длина и ориентация бара, морфология и кинематика внутреннего и ядерного кольца, отождествление спиральных рукавов с сегментами колец);
- исследования локальной кинематики в солнечной окрестности, анализа локальных гравитационных возмущений, исследования солнечной орбиты;

- построения динамических моделей других галактик;
- изучения процессов звездообразования.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Составлен каталог лучевых скоростей и собственных движений ОВ-ассоциаций. На основе каталога вычислены систематические движения ОВ-ассоциаций в плоскости Галактики, средние значения остаточных скоростей в звездно-газовых комплексах (таблица 1.3), параметры кривой вращения, в том числе большое значение угловой скорости вращения Галактики на расстоянии Солнца $\Omega_0 = 31 \pm 1$ км/с/кпк. Установлено, что кривая вращения Галактики является практически плоской в окрестности 3 кпк от Солнца, а все результаты мало зависят от способа редукции данных со спутника Hipparcos.
2. Показано, что модели Галактики с внешним кольцом класса R_1R_2 (модели с аналитическими барами) воспроизводят остаточные скорости ОВ-ассоциаций в звездно-газовых комплексах Персея и Стрельца: различие модельных и наблюдаемых скоростей не превышает $\Delta V = 3$ км/с. Дано объяснение резонансной кинематики, наблюдаемой в правильных кольцах : резонанс между эпициклическим и орбитальным движением создает систематические некруговые движения, направление которых зависит от позиционного угла точки относительно большой оси бара и от класса внешнего кольца. Выявлены различия в кинематике правильных колец и псевдоколец.
3. Установлено, что скорости газовых частиц в N-body моделях, усредненные на большом интервале времени (1 млрд лет), воспроизводят направления остаточных скоростей ОВ-ассоциаций в звездно-газовых комплексах Персея, Стрель-

ца и Местной системе: среднее различие модельных и наблюдаемых скоростей равно $\Delta V = 3$ км/с. Показано, что движение газовых частиц в области OLR бара определяется биениями между бар-модой и самой сильной из медленных мод. Биения проявляются в колебаниях плотности и скорости.

4. Выведено оптимальное значение позиционного угла Солнца относительно большой оси бара $\theta_b = 45 \pm 5^\circ$, обеспечивающего наилучшее согласие модельных и наблюдаемых скоростей. Модели с аналитическими барами и N-body модели дают одинаковый результат.
5. Впервые предложена спирально-кольцевая модель Галактики, способная объяснить многие крупномасштабные морфологические особенности спиральной структуры Галактики. Модель включает два внешних кольца, вытянутых перпендикулярно и параллельно бару, внутреннее кольцо, вытянутое параллельно бару, и два малых фрагмента спиральных рукавов. Показано, что наблюдаемый рукав Киля-Стрельца может состоять из двух восходящих сегментов внешних колец R_1 и R_2 , которые практически стыкуются друг с другом вблизи области Киля. Установлено, что расстояния до большинства гигантских комплексов звездообразования согласуются в пределах ошибок с заданной моделью.
6. Проведен Фурье анализ распределения ОВ-ассоциаций, имеющих одинаковые кинематические характеристики, по спиральным гармоникам. Обнаружено присутствие лидирующего компонента в спиральной структуре Галактики. Показано, что этот результат согласуется с положением Солнца вблизи нисходящего сегмента кольца R_2 , который можно представить в виде фрагмента лидирующей спирали.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. P. Rautiainen, A.M. Mel'nik/ N-body simulations in reconstruction of the kinematics of young stars in the Galaxy. **Astron. Astrophys.** 519, 70–82 (2010).
2. A.M. Mel'nik, P. Rautiainen/ Kinematics of the Outer Pseudorings and the Spiral Structure of the Galaxy, Proceedings of the B.V. Kukarkin Centenary Conference "Variable Stars, the Galactic Halo, and Galaxy Formation", C. Sterken, N. Samus and L. Szabados (Eds.), 2010, Published by Sternberg Astronomical Institute of Moscow University, Moscow, Russia, pp. 137–140.
3. A.M. Mel'nik, A.K. Dambis/ Kinematics of OB-associations and the new reduction of the Hipparcos data. **MNRAS** 400, 518–523 (2009).
4. А.М. Мельник, П. Раутиайнен/ Кинематика внешних псевдоколец и спиральная структура Галактики. **Письма в Астрон. журн.** 35, 676–692 (2009).
5. А.М. Мельник/ Внешнее псевдокольцо в Галактике. **Письма в Астрон. журн.** 32, 9–15 (2006).
6. A.M. Mel'nik/ Outer Pseudoring in the Galaxy, **Astron. Nachr.** 326, 599 (2005).
7. А.М. Мельник/ Лидирующая волна как компонент спиральной структуры Галактики. **Письма в Астрон. журн.** 31, 91–98 (2005).
8. А.М. Мельник/ Особенности поля скоростей OB-ассоциаций и спиральная структура Галактики. **Письма в Астрон. журн.** 29, 349–355 (2003).
9. Т.Г. Ситник, А.М. Мельник, В.В. Правдикова/ Поточковые движения молекулярных облаков, ионизованного водорода

- и OB звезд в рукаве Лебеда. **Астрон. журн.** 78, 40–51 (2001).
10. А.М. Мельник, А.К. Дамбис, А.С. Расторгуев/ Периодическая структура поля остаточных скоростей OB-ассоциаций. **Письма в Астрон. журн.** 27, 611–624 (2001).
 11. A.M. Mel'nik, A.K. Dambis, A.S. Rastorguev/ Periodic Pattern in the Residual Velocity Field of OB-Associations. **Astron. Astrophys. Trans.** 20, 107–110 (2001).
 12. А.К. Дамбис, А.М. Мельник, А.С. Расторгуев/ Тригонометрические параллаксы и кинематически согласованная шкала расстояний до OB-ассоциаций. **Письма в Астрон. журн.** 27, 68–75 (2001).
 13. A.K. Dambis, E.V. Glushkova, A.M. Mel'nik, A.S. Rastorguev/ The Distance Scale and the Rotation Curve of Young Supergiants and Open Clusters. **Astron. Astrophys. Trans.** 20, 161–164 (2001).
 14. А.М. Мельник, А.К. Дамбис, А.С. Расторгуев/ Периодическая структура поля пространственных скоростей цефеид и спиральные рукава Галактики. **Письма в Астрон. журн.** 25, 602–610 (1999).
 15. Т.Г. Ситник, А.М. Мельник/ Волновая природа рукава Лебеда-Ориона. **Письма в Астрон. журн.** 25, 194–208 (1999).
 16. А.М. Мельник, Т.Г. Ситник, А.К. Дамбис, Ю.Н. Ефремов, А.С. Расторгуев/ Кинематические свидетельства волновой природы спирального рукава Киля-Стрельца. **Письма в Астрон. журн.** 24, 689–698 (1998).
 17. E.V. Glushkova, A.K. Dambis, A.M. Mel'nik, A.S. Rastorguev/ Investigation of the kinematics of young disk populations. **Astron. Astrophys.** 329, 514–521 (1998).

18. Yu.N. Mishurov, I.A. Zenina, A.K. Dambis, A.M. Mel'nik, A.S. Rastorguev/ Is the Sun located near the corotation circle? **Astron. Astrophys.** 323, 775–780 (1997).
19. Т.Г. Ситник, А.М. Мельник/ Остаточные движения ОВ ассоциаций и связанных с ними молекулярных облаков. **Письма в Астрон. журн.** 22, 471–480 (1996).
20. А.К. Дамбис, А.М. Мельник, А.С. Расторгуев/ Кривая вращения системы классических цефеид и расстояние Солнца от центра Галактики. **Письма в Астрон. журн.** 21, 331–347 (1995).
21. А.М. Мельник, Ю.Н. Ефремов/ Новый список ОВ ассоциаций в Галактике. **Письма в Астрон. журн.** 21, 13–30 (1995).
22. A.M. Mel'nik/ The Absolute proper motions of 79 stars from Humphreys's list of stars in associations. **Astron. Astrophys. Trans.** 5, 243–247 (1994).
23. A.M. Mel'nik/ Description of the catalog "Line-of-sight velocities and proper motions of OB-associations", VizieR on-line Catalog, Cat74000518 (2009).
24. A.M. Valitova (Mel'nik), D.K. Karimova, E.D. Pavlovskaya/ The catalogue of proper motions for High Luminosity Stars, **Bull. Inform. CDS** 37, 177–178 (1989).
25. А.М. Валитова (Мельник), Е.Д. Павловская, Д.К. Каримова/ Каталог собственных движений звезд высокой светимости спектральных классов О и В. В сборнике: Каталог измерений лучевых скоростей. Каталог собственных движений. М. МГУ, 1990, стр. 70–91.

Апробация работы

Основные результаты, полученные в диссертации, неоднократно докладывались на семинарах по звездной астрономии ГАИШ МГУ, а также на следующих российских и международных конференциях:

- Международная конференция “Dynamics and Evolution of Disk Galaxies”, Пущино-Москва, Россия, май 2010 г.
- Всероссийский астрономический семинар “Современная звездная астрономия”, посвященный 100-летию Петра Григорьевича Куликовского, Москва, июнь 2010 г.
- Международная конференция “Variable Stars, the Galactic Halo, and Galaxy Formation”, Звенигород, Россия, октябрь 2009 г.
- Всероссийская астрономическая конференция “Звездные системы” (к 100-летию Павла Петровича Паренаго), Москва, май 2006 г.
- Всероссийская астрономическая конференция “Передние рубежи астрофизики”, Москва, май 2005 г.
- Международная конференция “From cosmological structures to the Milky Way”, Прага, Чешская республика, сентябрь 2004 г.
- Международная конференция JENAM-2003, Будапешт, Венгрия, август 2003 г.
- Семинар ESO “Stellar Complexes and the Gould Belt”, Мюнхен, Германия, октябрь 2001 г.
- Международная конференция JENAM-2000, Москва, май 2000 г.
- Международная конференция JENAM-1999, Тулуза, Франция, сентябрь 1999 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 164 страницах, включает 16 таблиц и 45 рисунков. Список литературы содержит 231 наименование.

Содержание работы

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, формулируются цели, обосновывается научная новизна работы, а также ее научная значимость, и формулируются выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена каталогу лучевых скоростей и собственных движений ОВ-ассоциаций, выделенных Блаха и Хамфрис (1989) на основе фотометрических данных. Сравняются собственные движения, выведенные для старой и новой редукции каталога Hipparcos. Мы находим параметры кривой вращения в окрестности 3 кпк от Солнца и вычисляем остаточные скорости в пяти областях интенсивного звездообразования, которые практически совпадают со звездно-газовыми комплексами, выделенными Ефремовым и Ситник (1988). Анализ лучевых скоростей и собственных движений ОВ-ассоциаций, показал, что кривая вращения Галактики является практически плоской в окрестности 3 кпк от Солнца и соответствует большому значению угловой скорости вращения на расстоянии Солнца, $\Omega_0 = 31 \pm 1$ км/с/кпк. Мы вычислили параметры кривой вращения, компоненты движения Солнца и коэффициент шкалы расстояний k для различных значений галактоцентрического расстояния Солнца $R_0 = 7.1\text{--}9.0$ кпк. Значения Ω_0 , u_0 , v_0 и k практически не зависят от выбора R_0 . Параметры Ω'_0 и Ω''_0 заметно меняются с изменением R_0 , но при этом значение постоянной Оорта $A = -0.5R_0\Omega'_0$ остается практически на одном уровне $A = 17.3\text{--}17.9$ км/с/кпк. Показано, что шкала расстояний Блаха и Хамфрис требует сокращения

на 10–20%. Все результаты мало зависят от способа редукции данных со спутника Hipparcos (Мельник и Дамбис, 2009).

Во второй главе представлена попытка интерпретировать систематические движения молодых звезд в рамках модели спирального узора. Исследуется периодическая структура поля остаточных скоростей OB-ассоциаций. Мы определяем длину волны λ периодических изменений скорости вдоль галактического радиус-вектора, которая в первом приближении равна расстоянию между рукавами. Именно значение λ , а не угол закрутки рукавов, непосредственно определяется из анализа кинематики звезд в окрестности 3 кпк от Солнца. Для вычисления угла закрутки необходима дополнительная информация о числе спиральных рукавов. Полученное значение $\lambda = 2 \pm 0.2$ кпк соответствует углу закрутки спиральных рукавов $i = 5^\circ$ для двухрукавной модели и $i = 10^\circ$ для четырехрукавной модели спирального узора (Мельник и др., 2001). Совпадение положений минимумов в колебаниях радиального и азимутального компонентов скорости указывает на присутствие ударной волны в диске Галактики (Мельник, 2003). Две особенности спиральной структуры Галактики - присутствие ударной волны и тугозакрученный спиральный узор - заставляют нас отказаться от концепции квазистационарного спирального узора.

Мы попытались определить очертания глобального спирального узора, исследуя распределение объектов, демонстрирующих одинаковые направления радиального компонента остаточной скорости. Области Персея, Лебеда и Киля с систематическими некруговыми движениями, направленными к центру Галактики, могли бы принадлежать одному и тому же, возможно клочковатому, спиральному рукаву. Фурье анализ распределения молодых объектов с одинаковыми кинематическими характеристиками по логарифмическим спиралям выявил присутствие лидирующего компонента в спиральной структуре Галактики, что свидетельствует о существовании кольцевой структуры в ней (Мельник, 2005).

Третья глава посвящена моделям с аналитическими барами, в которых газовые диски формируют внешние кольца под влиянием вращающегося бара, потенциал которого задан аналитическим выражением. Показано, что кинематика внешних колец и псевдоколец определяется двумя процессами: резонансной настройкой и вытеканием газа. Резонансная кинематика отчетливо наблюдается в правильных кольцах, тогда как кинематика вытекающего газа проявляет себя в псевдокольцах. Резонанс между эпициклическим и орбитальным движением в системе отсчета, вращающейся со скоростью бара, приводит к настройке эпициклических движений частиц в соответствии с вращением бара. Это регулирование создает систематические некруговые движения, направление которых зависит от позиционного угла точки относительно большой оси бара и от класса внешнего кольца. Модели Галактики с псевдокольцом класса $R_1R'_2$ хорошо воспроизводят радиальные и азимутальные компоненты остаточных скоростей ОВ-ассоциаций в областях Персея и Стрельца: различие модельных и наблюдаемых скоростей не превышает 3 км/с. Кинематика ОВ-ассоциаций в области Персея указывает на присутствие кольца R_2 в Галактике, тогда как скорости в области Стрельца свидетельствуют о существовании кольца R_1 . Азимутальные скорости в области Стрельца точно определяют позиционный угол Солнца относительно большой оси бара $\theta_b = 45 \pm 5^\circ$ (Мельник и Раутиайнен, 2009).

В четвертой главе анализируются N-body модели, в которых бары формируются под действием гравитационной неустойчивости. Галактический диск в наших моделях включает две подсистемы: звездная подсистема моделировалась с помощью 8 миллионов гравитирующих частиц, а газовая – с помощью 40 тысяч негравитирующих частиц, которые могут неупруго сталкиваться друг с другом. Показано, что модельный звездный диск быстро формирует бар, начальная угловая скорость которого достаточно велика. Она быстро уменьшается на начальной стадии и выхо-

дит на плато, удерживая $\Omega \approx 50$ км/с/кпк в течении нескольких миллиардов лет. Чтобы уменьшить влияние медленных мод и случайных возмущений, мы усредняем мгновенные скорости газовых частиц, расположенных внутри границ звездно-газовых комплексов, и сравниваем их средние скорости с наблюдаемыми скоростями. Мы также изучаем периодичность в колебаниях скоростей, зависимость средних скоростей от позиционного угла Солнца и эволюционные аспекты кинематики. Рассмотренная N-body модель воспроизводит кинематику OB ассоциаций в областях Персея и Стрельца и в Местной системе. Скорости газовых частиц, усредненные на большом интервале времени (1 млрд. лет), воспроизводят направление радиального и азимутального компонентов остаточных скоростей в этих областях. Среднее различие модельных и наблюдаемых скоростей составляет $\Delta V = 3.3$ км/с. Успех N-body моделей в Местной системе вероятно вызван учетом гравитации от звездного кольца R_1 , которая игнорировалась в моделях с аналитическими барами (Раутиайнен и Мельник, 2010).

В рассмотренных N-body моделях OLR бара расположен вблизи Солнца и всегда вне солнечного круга ($R_{OLR} = 8.1$ кпк при $R_0 = 7.5$ кпк). В целом, это согласуется с результатами исследований кинематики звезд в малой окрестности Солнца, $r < 250$ пк (Денен, 2000; Фукс, 2001; Минчев и др., 2009), хотя в этих работах OLR бара всегда оказывается лежащим внутри солнечного круга. Оптимальное значение позиционного угла Солнца θ_b , обеспечивающего наилучшее согласие модельных и наблюдаемых скоростей, составляет $\theta_b = 45 \pm 5^\circ$. Наши модели формируют достаточно длинный бар ($R_{bar} \approx 4.0$ кпк), но его длина и ориентация согласуются с результатами исследований распределения красных гигантов (К-М III) в центральной области Галактики, основанных на наблюдениях в среднем и ближнем инфракрасном диапазоне (Бенжамин и др., 2005; Кабрера-Лаверс и др., 2007).

Пятая глава посвящена морфологии спирального узора Галактики. Мы сравниваем распределение частиц в модельных дисках с наблюдаемой спиральной структурой. Модель Галактики с кольцом $R_1R'_2$ может объяснить некоторые крупномасштабные морфологические особенности спиральной структуры Галактики. Рукав Киля-Стрельца вполне может состоять из двух восходящих сегментов внешних колец R_1 и R_2 , которые практически стыкуются друг с другом вблизи области Киля. Рукава Персея и Южного Креста можно частично отождествить с нисходящими сегментами кольца R_2 . Модель двухкомпонентного внешнего кольца также может объяснить существование некоторых тангенциальных направлений. Исследуется спирально-кольцевая модель Галактики, включающая два внешних кольца, внутреннее кольцо и два малых фрагмента спиральных рукавов, соединяющих внутреннее и внешнее кольца. Показано, что расстояния до большинства гигантских комплексов звездообразования каталога Руссейл (Руссейл, 2003; Руссейл и др., 2007) согласуются в пределах ошибок с заданной моделью.

В Заключение кратко изложены основные результаты диссертации.

Работа с соавторами

В работах с Пертти Раутиайненом мне принадлежит равная доля участия в постановке задачи, визуализации и интерпретации моделей и написании статей. Моделирование полностью выполнено П. Раутиайненом. В работе с другими соавторами мне принадлежит равная доля участия в работе над статьями.

Краткий список литературы

1. Бенжамин и др. (R.A. Benjamin, E. Churchwell, B.L. Babler et al.), *Astrophys. J.* **630**, L149 (2005).
2. Берд и др. (G. Byrd, P. Rautiainen, H. Salo, R. Buta, D.A. Crocker), *Astron. J.* **108**, 476 (1994).
3. Бертон, Баниа (W.B. Burton, T.M. Bania), *Astron. Astrophys.* **33**, 425 (1974).
4. Бинни, Тремейн (J. Binney, S. Tremaine), *Galactic Dynamics*, Princeton Univ. Press, 2008.
5. Биссанз и др. (N. Bissantz, P. Englmaier, O. Gerhard), *MNRAS* **340**, 949 (2003).
6. Блаха, Хамфрис (C. Blaha, R.M. Humphreys), *Astron. J.* **98**, 1598 (1989).
7. Блиц и др. (L. Blitz, J. Binney, K.J. Lo, J. Bally, P.T.P. Ho), *Nature* **361**, 417 (1993).
8. Бранд, Блиц (J. Brand, L. Blitz), *Astron. Astrophys.* **275**, 67 (1993).
9. Бута (R. Buta), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **96**, 39 (1995).
10. Бута, Ком (R. Buta, F. Combes), *Fund. Cosmic Physics* **17**, 95 (1996).
11. Бута и др. (R. Buta, H.G. Corwin, S.C. Odewahn), *The de Vaucouleurs Atlas of Galaxies*, Cambridge Univ. Press (2007).
12. Бута, Крокер (R. Buta, D.A. Crocker), *Astron. J.* **102**, 1715 (1991).
13. Валле (J.P. Vallée), *Astron. J.* **130**, 569 (2005).

14. Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. J.* **135**, 1301 (2008).
15. ван Льювен (F. van Leeuwen), *Astron. Astrophys.* **474**, 653 (2007).
16. Вейнер, Селвуд (B.J. Weiner, J.A. Sellwood), *Astrophys. J.* **524**, 112 (1999).
17. Герхард (O. Gerhard), *Tumbling, twisting, and winding galaxies: Pattern speeds along the Hubble sequence*, Eds. E. M. Corsini, V. P. Debattista, (2010 in press), arXiv: 1003.2489.
18. Дейм, Таддеуш (T.M. Dame, P. Thaddeus), *Astrophys. J.* **683**, L143 (2008).
19. Денен (W. Dehnen), *Astrophys. J.* **119**, 800 (2000).
20. Дриммел (R. Drimmel), *Astron. Astrophys.* **358**, 13 (2000).
21. Ефремов Ю.Н., *Астрон. журн.* (в печати), arXiv:1011.4576 (2011).
22. Ефремов Ю.Н., Ситник Т.Г., *Письма в Астрон. журн.* **14**, 817 (1988).
23. Жоржелин, Жоржелин (Y.M. Georgelin, Y.P. Georgelin), *Astron. Astrophys.* **49**, 57 (1976).
24. Инглмайер, Герхард (P. Englmaier, O. Gerhard), *MNRAS* **304**, 512 (1999).
25. Инглмайер, Герхард (P. Englmaier, O. Gerhard), *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* **94**, 369 (2006).
26. Кабрера-Лаверс и др. (A. Cabrera-Lavers, P.L. Hammersley, C. Gonzalez-Fernandez, M. Lopez-Corredoira, F. Garzon, and T.J. Mahoney), *Astron. Astrophys.* **465**, 825 (2007).

27. Калнайс (A.J. Kalnajs), *Dynamics of Disc Galaxies*, Ed. B. Sundelius (Göteborgs Univ., 1991) p. 323.
28. Контопулос, Гросбол (G. Contopoulos, P. Grosbol), *Astron. Astrophys. Review* **1**, 261 (1989).
29. Лин и др. (C.C. Lin, C. Yuan, F.H. Shu), *Astrophys. J.* **155**, 721 (1969).
30. Лепин и др. (J.R.D. Lépine, Y.N. Mishurov, S.Y. Dedikov), *Astrophys. J.* **546**, 234 (2001).
31. Массет, Таггер (F. Masset, M. Tagger), *Astron. Astrophys.* **322**, 442 (1997).
32. Минчев и др. (I. Minchev, C. Boily, A. Siebert, O. Bienayme), *MNRAS* **407**, 2122 (2010).
33. Мельник А.М., Письма в Астрон. журн. **29**, 349 (2003).
34. Мельник А.М., Письма в Астрон. журн. **31**, 91 (2005).
35. Мельник А.М., Письма в Астрон. журн. **32**, 9 (2006).
36. Мельник А.М., Дамбис А.К. (A.M. Melnik , A.K. Dambis), *MNRAS* **400**, 518 (2009).
37. Мельник А.М., Дамбис А.К., Расторгуев А.С., Письма в Астрон. журн. **27**, 611 (2001).
38. Мельник А.М., Раутиайнен П., Письма в Астрон. журн. **35**, 676 (2009).
39. Раутиайнен П., Мельник А.М. (P. Rautiainen, A.M. Melnik), *Astron. Astrophys.* **519**, 70 (2010).
40. Раутиайнен, Сало (P. Rautiainen, H. Salo), *Astron. Astrophys.* **348**, 737 (1999).

41. Раутиайнен, Сало (P. Rautiainen, H. Salo), *Astron. Astrophys.* **362**, 465 (2000).
42. Рейд, Ментен, Женг и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, et al.), *Astrophys. J.* **700**, 137 (2009).
43. Робертс (W.W. Roberts), *Astrophys. J.* **158**, 123 (1969).
44. Робертс (W.W. Roberts), *Astrophys. J.* **173**, 259 (1972).
45. Робертс, Юань (W.W. Roberts, C. Yuan), *Astrophys. J.* **161**, 887 (1970).
46. Робертс, Стюарт (W.W. Roberts, G.R. Stewart), *Astrophys. J.* **314**, 10 (1987).
47. Робертс, Хосман (W.W. Roberts, M.A. Hausman), *Astrophys. J.* **277**, 744 (1984).
48. Родригез-Фернандез, Ком (N.J. Rodriguez-Fernandez, F. Combes), *Astron. Astrophys.* **489**, 115 (2008).
49. Руссейл (D. Russeil), *Astron. Astrophys.* **397**, 133 (2003).
50. Руссейл и др. (D. Russeil, C. Adami, Y.M. Georgelin), *Astron. Astrophys.* **470**, 161 (2007).
51. Ситник Т.Г., Письма в Астрон. журн. **29**, 356 (2003).
52. Селвуд, Спарк (J.A. Sellwood, L.S. Sparke), *MNRAS* **231**, 25 (1988).
53. Фукс (R. Fux), *Astron. Astrophys.* **373**, 511 (2001).
54. Хоу и др. (L.G. Hou, J.L. Han, W.B. Shi), *Astron. Astrophys.* **499**, 473 (2009).
55. Хабин и др. (H.J. Habing, M.N. Sevenster, M. Messineo, G. van de Ven, and K. Kuijken), *Astron. Astrophys.* **458**, 151 (2006).

56. Чакрабарти (D. Chakrabarty), *Astron. Astrophys.* **467**, 145 (2007).
57. Чечвел и др. (E. Churchwell, B.L. Babler, M.R. Meade et al.), *PASP* **121**, 213 (2009).
58. Шварц (M.P. Schwarz), *Astrophys. J.* **247**, 77 (1981).
59. *The Hipparcos and Tycho Catalogs*, ESA SP-1200 (1997).