

На правах рукописи

УДК 524.3, 524.6
524.8, 524.47

Марсаков Владимир Андреевич

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ ПОДСИСТЕМ ГАЛАКТИКИ

01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Архыз – 2006

Работа выполнена в Ростовском государственном университете

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Владимир Евгеньевич Панчук

доктор физико-математических наук, профессор
Николай Николаевич Самусь

доктор физико-математических наук, профессор
Алексей Сергеевич Расторгуев

Ведущая организация: Уральский государственный университет

Защита состоится " 11 " апреля _____ 2007 г. в 10 часов на заседании
Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной астрофизической
обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний
Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Майорова Е.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Остаточные скорости и химический состав маломассивных звезд являются реальными носителями информации о химической и динамической эволюции Галактики и могут многое нам поведать об истории формирования ее подсистем. Эффективным инструментом извлечения этой информации оказываются комплексные статистические исследования указанных характеристик звезд галактического поля и скоплений. При этом задача исследований двоякая: выявление существующих в природе закономерностей и, одновременно, недопущение принятия искусственной, несуществующей в природе закономерности. Оба аспекта задачи в исследованиях звездных населений Галактики стоят очень остро, поскольку искомые изменения параметров внутри каждой галактической подсистемы, как правило, не превышают ошибок измерения этих параметров для отдельных объектов. Именно поэтому результаты разных авторов, основанные на использовании небольших по объему выборок звезд, зачастую противоречат друг другу. Отсюда ключевым моментом в данном вопросе, наряду с качеством, надежностью и однородностью используемых наблюдательных данных, является также и их количество, достаточное для получения статистически значимых результатов.

Актуальность темы. Проблемы строения, формирования и эволюции нашей Галактики являются одними из самых актуальных в современной астрофизике. Наиболее подходящими объектами для получения необходимой информации являются непроэволюционировавшие F-G-звезды, находящиеся на стадии горения водорода в ядре, поскольку из-за низкой температуры в их недрах они долгое время находятся в полосе главной последовательности и среди них присутствуют самые старые звезды Галактики. Кроме того, атмосферы таких звезд сохраняют практически неизменным химический состав межзвездной среды, из которой они в свое время образовались. Исследование детального химического состава в атмосферах этих долгоживущих маломассивных звезд способно помочь восстановлению

хронологической последовательности событий в ранней Галактике. Дело в том, что различные химические элементы синтезируются в звездах разных масс, которые эволюционируют с разной скоростью и последовательно обогащают межзвездную среду продуктами прошедших в них реакций ядерного синтеза. Поэтому относительные содержания некоторых химических элементов в последующих поколениях звезд позволяют оценить их относительный возраст. Особенно важное значение имеет исследование распределений относительных содержаний α -элементов (элементов, состоящих из ядер гелия), которые дают возможность извлечь информацию как об истории звездообразования, так и о перемешивании межзвездной среды в каждой исследуемой подсистеме Галактики.

В настоящий момент в окрестностях Солнца находятся представители всех галактических подсистем. Восстановление галактических орбит и проведение на их основе сегрегации звезд по подсистемам позволяет получать представление об объемах, оккупированных в Галактике объектами разных подсистем, и прослеживать закономерности между металличностью, относительными содержаниями некоторых химических элементов, кинематикой и возрастом, существующие среди звезд внутри каждой из них.

Развитие сети наземных и спутниковых автоматических станций наблюдения привело к тому, что появились объемные каталоги, содержащие однородные прецизионные астрометрические и фотометрические данные для многих тысяч звезд. Эти данные позволяют определять для значительной части из них эффективные температуры, абсолютные звездные величины, металличности, компоненты пространственных скоростей и элементы галактических орбит для последующего проведения по ним комплексных статистических исследований. Одновременно к настоящему моменту в различных астрономических центрах накоплено большое количество определений разными авторами детального химического состава в ближайших звездах поля на основе спектров высокого разрешения. Разнородность этих данных не всегда позволяет их непосредственно сравнивать между собой,

поэтому первоочередной становится задача приведения данных в однородные шкалы для последующего анализа.

Лишь небольшой процент звезд, из находящихся в настоящее время в окрестностях Солнца, принадлежит сферическим подсистемам Галактики. Поэтому при рассмотрении вопросов, касающихся формирования и эволюции последних, очень большое значение имеют исследования старейших объектов Галактики – шаровых звездных скоплений и переменных звезд типа RR Лиры поля, поскольку они видны на значительных расстояниях от Солнца и позволяют непосредственно наблюдать их пространственное распределение. Для этих объектов также появилось в последнее время большое количество прецизионных измерений параметров. Отсюда возникает следующая актуальная задача – получение по разным объектам характерных свойств старых подсистем Галактики и сравнение их между собой. Такие исследования значительно увеличат надежность окончательных выводов.

Значительные силы и средства потрачены на получение этих наблюдательных данных. Их привлечение позволит существенно прояснить многие вопросы формирования и эволюции галактических подсистем, установить характер процессов звездообразования и обогащения тяжелыми элементами на разных стадиях эволюции, понять происхождение многих наблюдаемых сейчас свойств Галактики. Отсюда совершенно очевидна огромная важность систематизации этого материала, его астрофизического анализа и установления на этой основе принципиальных особенностей эволюции Галактики.

Целью работы является воссоздание структуры Галактики, выявление существующих закономерностей и восстановление хронологии формирования, а также химической и динамической эволюции каждой галактической подсистемы на основе специально составленных больших репрезентативных выборок однородных определений химического состава, пространственных скоростей, элементов галактических орбит и возрастов звезд и шаровых скоплений, используя методы комплексного статистического исследования.

Научная новизна работы заключается в том, что **впервые** получены следующие результаты.

- Обнаружены точки поворота на диаграмме «цвет – абсолютная звездная величина» для звезд поля тонкого диска и показано, что нижние огибающие главных последовательностей звезд разной металличности в пределах спектрального диапазона F совпадают между собой. Показано, что в тонком диске связи и металличности и относительного содержания магния с возрастом не являются однозначными и среди звезд одинакового возраста существует реальная дисперсия химического состава.
- Исследованы зависимости параметров эллипсоидов скоростей F-звезд тонкого диска от их металличности и возраста. Показано, что ни один из известных релаксационных механизмов в диске не в состоянии объяснить выявленные зависимости, поэтому сделан вывод, что кинематика звезд зависит в основном от динамического состояния межзвездного газа на момент их образования.
- Показано, что в тонком диске абсолютные величины радиального и вертикального градиентов металличности и обнаруженного в работе вертикального градиента относительного содержания магния систематически уменьшаются при переходе к более старым звездам.
- На базе восстановленного статистическим методом «реального» распределения F-звезд по высоте над галактической плоскостью показано, что в процессе эволюции дисковая подсистема в целом становится более плоской и при одинаковом возрасте концентрация к плоскости Галактики у металлических звезд всегда значительно выше, чем у малометаллических.
- На основе исследования относительных содержаний магния, $[Mg/Fe]$, в звездах тонкого диска показано, что скорость звездообразования в нем уменьшается с увеличением галактоцентрического расстояния и за пределами солнечного круга звездообразование какое-то время отсутствовало, тогда как внутри его этот процесс проходил непрерывно.

- На основе предложенных в работе критериев проведена сегрегация всех доступных шаровых скоплений, переменных типа RR Лиры поля и близких высокоскоростных звезд по трем старым подсистемам Галактики (толстый диск, «собственное» гало и «аккрецированное» гало), определены характерные параметры подсистем и проведен сравнительный анализ взаимосвязей между относительными содержаниями магния, металличностями и пространственными положениями звездных объектов внутри каждой подсистемы.
- Обнаружено, что относительные содержания магния в звездах толстого диска лежат в диапазоне ($0.0 < [\text{Mg}/\text{Fe}] < 0.5$) и уменьшаются с ростом металличности, начиная от точки $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.0$. Это интерпретируется в пользу большой длительности процесса звездообразования в толстом диске.
- В толстом диске обнаружены вертикальные градиенты металличности и относительного содержания магния, которые могут появиться в подсистеме только в случае формирования ее или в условиях медленного коллапса протогалактики, или в случае неоднократного «разогревания» звезд первичного тонкого диска Галактики другими галактиками.
- Приводятся доказательства того, что некоторые шаровые скопления и звезды поля ведут свое происхождение от карликовых галактик-спутников, разрушенных приливными силами Галактики на разных этапах ее эволюции. В итоге показано, что подавляющее число малометаллических объектов $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ в сферической составляющей Галактики имеют предположительно внегалактическое происхождение.
- Обнаружено, что предположительно аккрецированные шаровые скопления демонстрируют одновременное уменьшение массы (полной светимости) и возраста с увеличением галактоцентрического расстояния, создавая дефицит далеких старых массивных скоплений.
- Показано, что у звезд «собственного» гало отношения $[\text{Mg}/\text{Fe}] > 0.2$, что свидетельствует о сравнительной однородности межзвездного вещества в ранней Галактике на стадии формирования подсистемы.

- Обнаружено, что в атмосферах старых малометаллических предположительно аккрецированных звезд отношение $[Eu/Mg] < 0.0$, при зачастую солнечном относительном содержании магния, что значительно меньше, чем у генетически связанных с Галактикой звезд такой же металличности. Отсюда сделан вывод о том, что максимальные массы сверхновых SNeII за пределами ранней Галактики были меньше, чем внутри нее.
- На основании обнаруженных связей между относительными содержаниями магния, значениями металличности и элементами галактических орбит предположительно аккрецированных звезд выдвинуто предположение, что при уменьшении масс карликовых галактик в них одновременно уменьшаются максимальные массы сверхновых SNe II, а следовательно, и выход α -элементов.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов работы обеспечивается: использованием наиболее точных из опубликованных измеряемых величин различных объектов; аккуратным определением параметров звезд поля и шаровых скоплений по современным и оригинальным методикам; тщательным сведением компилятивных данных в однородные шкалы и составлением репрезентативных выборок с объемами, достаточными для получения статистически надежных результатов; исследованием свойств каждой подсистемы Галактики по независимым выборкам объектов различных населений; привлечением для формулирования окончательных выводов результатов других авторов из смежных областей исследований; согласованностью выводов с современными представлениями о физике объектов; повторением результатов и выводов работы другими авторами; цитированием результатов.

Научная, методическая и практическая значимость работы.

Полученные в диссертации результаты углубляют наши представления о строении и эволюции Галактики и вскрывают несоответствие ряда существующих в этой области концепций наблюдательным данным.

Созданные объемные каталоги однородных астрофизических параметров различных объектов, представленные в Страсбургском центре звездных данных, уже используются и найдут дальнейшее практическое применение в исследованиях структуры, а также химической и динамической эволюции Галактики во многих (в том числе и зарубежных) астрономических учреждениях.

Представление о неоднозначности связи между возрастом и металличностью в галактическом диске и существовании реальной дисперсии металличности у звезд любого возраста, уже получившее подтверждение в работах других авторов, заставляет внести существенные коррективы в теорию химической эволюции и происхождения межзвездного вещества в подсистеме. Обоснование вывода о существовании отрицательного тренда скорости звездообразования вдоль галактоцентрического радиуса снимает вопрос о происхождении радиального градиента металличности в тонком диске.

Вывод о том, что населения шаровых скоплений и высокоскоростных звезд поля образуют в Галактике три, а не две старые подсистемы – толстый диск и «собственное» гало с одной стороны, и «аккрецированное» гало – с другой, заставляет отказаться от устоявшейся концепции, согласно которой все объекты Галактики образовались из единого протогалактического облака. Причем среди малометаллических объектов аккрецированные составляют большинство в сферической подсистеме, а относительные содержания химических элементов, произведенных в разных процессах ядерного синтеза, у них значимо отличаются от аналогичных содержаний у звезд, генетически связанных с единым протогалактическим облаком. Этот вывод открывает новое направление в теории формирования и химической эволюции нашей и других галактик.

Обнаружение в «аккрецированном» гало наблюдательных проявлений зависимости начальной функции масс звезд от полной массы их родительских карликовых галактик диктует настоятельную необходимость в получении новых наблюдательных данных о химическом составе и кинематике

малометаллических субкарликов и субгигантов поля. Можно полагать, что эти выводы послужат стимулом к развертыванию наблюдательных программ в этой области.

Методическую ценность имеют следующие разработки: результаты исследований систематических эффектов, вызываемых случайными ошибками в определении расстояний, покраснений, индексов металличности и светимости F-звезд по данным $uvby, \beta$ -фотометрии; экспресс-метод для массового компьютерного определения возрастов звезд по теоретическим изохронам; метод статистического восстановления реального распределения по высоте различных объектов на солнечном галактоцентрическом расстоянии, основанном на вычислении вероятности нахождения звезд в разных участках орбиты; методика сведения разнородных наблюдательных данных в однородные шкалы с присвоением веса, как каждому источнику, так и каждому индивидуальному измерению; метод сегрегации звездных объектов по подсистемам Галактики.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Обнаружение в тонком диске неоднозначности связей «возраст – металличность» и «возраст – относительное содержание магния» и существования реальной дисперсии химического состава среди звезд одинакового возраста. Вывод о большой дисперсии отношения $[Fe/H]$ в первые несколько миллиардов лет формирования подсистемы и о начавшемся примерно 5 млрд. лет назад ее уменьшении с одновременным увеличением средней металличности и уменьшением среднего относительного содержания магния в результате активизации процессов звездообразования и перемешивания межзвездной среды.
2. Обнаружение различия степени концентрации к плоскости Галактики и параметров эллипсоидов скоростей у звезд тонкого диска разной металличности, но одинакового возраста. Вывод о том, что звезды разной металличности рождаются в каждый момент времени из вещества, находящегося в различных динамических состояниях, причем большие

размеры подсистемы малометаллических ($[Fe/H] < -0.1$) звезд поддерживаются падением на диск бедного металлами газа из внешних областей Галактики.

3. Обнаружение изменения хода зависимости « $[Mg/Fe] - [Fe/H]$ » в тонком диске с удалением от центра Галактики и вывод о том, что скорость звездообразования уменьшается с увеличением галактоцентрического расстояния, при этом за пределами солнечного круга звездообразование какое-то время отсутствовало, тогда как внутри его этот процесс проходил непрерывно.
4. Результаты разнесения шаровых скоплений и высокоскоростных звезд поля по подсистемам Галактики и вывод о том, что подавляющее число малометаллических объектов ($[Fe/H] < -1.0$) в сферической составляющей имеют предположительно внегалактическое происхождение.
5. Обнаружение в подсистеме толстого диска отрицательного вертикального градиента металличности среди шаровых скоплений, переменных звезд типа RR-Лиры поля и F-G-карликов поля и положительного вертикального градиента относительных содержаний магния среди звезд поля.
6. Обнаружение тенденции уменьшения относительного содержания магния в звездах толстого диска с ростом металличности, начиная от значения $[Fe/H] \approx -1.0$, и вывод о большой длительности процесса звездообразования в подсистеме.
7. Заключение о нахождении на больших галактоцентрических расстояниях преимущественно маломассивных «аккрецированных» шаровых скоплений малого возраста и вывод о том, что маломассивные шаровые скопления образовывались преимущественно в карликовых галактиках низкой массы.
8. Заключение о различии отношений $[Eu/Mg]$ в «аккрецированных» и генетически связанных звездах Галактики и об уменьшении относительных содержаний магния с увеличением размеров и наклонов орбит «аккрецированных» звезд. Следующий отсюда вывод об уменьшении

максимальных масс SNe II в их родительских карликовых галактиках-спутниках с уменьшением полной массы последних.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертации нашли отражение в отчетах по НИР, выполненных по планам НИИ физики и кафедры физики космоса РГУ, а также по грантам «Межотраслевая научно-техническая программа Астрономия» - 1992 – 1995, «Ключевые проблемы астрономии» - 1993 – 1996, ESO – 1994, 1995, «Университеты России» 1993 - 1995, Миннауки 1994, 1995, РФФИ – 00-02-17689, Роснауки – 02.438.11.7001, Федерального агентства по образованию РНП – 2.1.1.3486 и 2.2.3.1.3950.

Апробация результатов работы.

Результаты докладывались на астрофизических семинарах отдела космических исследований НИИ физики и кафедры физики космоса РГУ, а также семинарах САО РАН, ИНАСАН и ГАИШ МГУ; на международных конференциях: «Создание и обработка астрономических каталогов на ЭВМ» (Рига, 1986), «Структура и эволюция звездных систем» (Петрозаводск, 1995), «Переменные звезды – ключ к пониманию строения и эволюции Галактики» (Москва, 1999), Собрании Европейского астрономического общества JENAM-2000 (Москва, 2000), “Звездная динамика: от классической до современных моделей” (Санкт-Петербург, 2000), «Химическая и динамическая эволюция звезд и галактик» (Украина, Одесса, 2002), «От лития до урана» (IAU Symposium 228, Франция, Париж, 2005); на Всесоюзных и Всероссийских конференциях: «Структура галактик и звездообразование» (Киев, 1983), «Химическая эволюция галактик» (Н. Архыз, 1985), совещание РГ «Галактика» и «Звездные скопления» (Свердловск, 1986), «Актуальные проблемы астрофизики» (Абрау-Дюрсо, 1986), «Физика звездных атмосфер» (Ростов-на-Дону, 1987), «Звездные скопления» (Свердловск, 1987), «Кинематика и динамика звездных систем» (Ленинград, 1988), «Проблемы физики и динамики звездных систем» (Ташкент, 1989), ВАК-2001 (Санкт-Петербург), ВАК-2004

(Москва), «Звездные системы» (Москва, 2006) «Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее» (Санкт-Петербург, 2006).

Личный вклад автора.

Автору принадлежит постановка всех задач, формулировка всех выводов и написание текстов всех статей, за исключением §1.1 и §1.3. Разработка методик определения физических и кинематических параметров звезд, принципы составления компилятивных каталогов, проведение статистической обработки данных и астрофизический анализ результатов принадлежат автору равноправно с Ю.Г. Шевелевым в главах 1, 2 и с Т.В. Борковой в главах 3, 4. В §1.1 и §1.3 постановка задач и формулировка выводов принадлежит автору равноправно с А.А. Сучковым, а интерпретация результатов принадлежит автору равноправно с А.А. Сучковым и Ю.Г. Шевелевым.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 249 источников. Она изложена на 350 страницах, включая 109 рисунков и 9 таблиц, дополнительно в фондах Страсбургского центра звездных данных находится 8 каталогов.

Результаты, изложенные в работе, получены в течение более чем двадцати лет и размещены в порядке, соответствующему их завершению. Первые две главы и третий параграф четвертой главы посвящены исследованию тонкого диска, тогда как свойства объектов старых подсистем Галактики исследованы в двух последних главах. Каждый параграф представляет собой отдельное законченное исследование, результаты которого опубликованы, как правило, в нескольких статьях. В начале каждого параграфа описано предшествующее состояние разрабатываемой в нем проблемы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели работы и положения, выносимые на защиту, указаны новизна и практическое значение полученных результатов, а также приведен список публикаций автора, на которых базируется представляемая диссертационная работа.

Первая глава посвящена исследованию распределения близких F-звезд поля по содержанию в них тяжелых элементов и связи металличности с кинематикой и возрастом звездных населений в подсистеме тонкого диска Галактики. В качестве основного источника для определения физических параметров исследуемых звезд в этой главе использована среднеполосная фотометрическая система $uvby, \beta$ [3, 4, 13, 14, 21]. Были исследованы систематические эффекты, вызываемые случайными ошибками в определении расстояний, покраснений (E_{b-y}), индексов металличности (δm_1) и светимости (δc_1) F-звезд из нескольких каталогов с $uvby, \beta$ -фотометрией. Показано, что выборки F-звезд, отобранные по видимой звездной величине $V < 9^m$, содержат не более 30% покрасневших и возможных двойных звезд. Сделан вывод, что из-за больших ошибок измерения индекса β , незначительной величины покраснения и вероятного присутствия некоторого количества неразрешенных двойных для близких звезд предпочтительнее пользоваться шкалой расстояний, основанной на данных четырехцветной $uvby$ -фотометрии, без процедуры исправления за покраснение, поскольку случайные ошибки в измеряемых величинах u, v, b, y, β приводят к ложным корреляциям: $E_{b-y} \sim \delta m_1$, $E_{b-y} \sim \delta c_1$, которые искажают результаты статистических исследований. Обнаружена зависимость между металличностями и избытками цвета, получаемыми из фотометрии, которая объясняется присутствием в выборке неразрешенных двойных звезд. Показано, что F-звезды диска с разным химическим составом распределены в окрестностях Солнца практически однородно, и сделано заключение о возможности проведения статистических исследований по близким звездам с параметрами, определенными из фотометрических данных [12].

Исследование распределения металличности примерно для двух с половиной тысяч F-звезд выявило, что при возрастании эффективной температуры содержание тяжелых элементов у близких F-карликов скачком увеличивается в районе спектрального класса F5, при этом одновременно

уменьшается дисперсия металличности. Показано, что распределение металличности карликов F6 – G0 нельзя считать гауссовским, но можно рассматривать как сумму двух нормальных кривых. При этом в середине распределения наблюдается дефицит звезд (провал), разделяющий их по металличности на две группы; ранние F-карлики такого провала не имеют [1].

Третий параграф является центральным в первой главе. В нем по данным *ivby*-фотометрии и собственным движениям примерно для 5500 близких F-звезд [18] обнаружено, что в узких диапазонах металличности наблюдаются резкие падения численности на распределениях по температурному индексу ($b-y$) с голубой стороны, которые, как мы полагаем, являются точками поворота главной последовательности звезд поля фиксированной металличности. Далее показано, что возрасты соответствующих точек поворота, определенные по теоретическим изохронам, обнаруживают значимую корреляцию со средними значениями пекулярных скоростей звезд, находящихся в окрестности точек поворота. Причем подгруппы звезд разного цвета при низкой металличности имеют практически одинаковые пекулярные скорости, тогда как при высокой металличности скорости «красных» подгрупп много больше, чем «голубых» подгрупп. Сделан вывод, что эти свойства F-звезд приводят к «двумерности» зависимости металличности от возраста, предполагающей сравнительно большой разброс содержания металлов у старых звезд и сужение разброса металличности с одновременным увеличением средней металличности при уменьшении возраста. Такая зависимость «возраст – металличность» свидетельствует, что исходное пространственное распределение содержания металлов в межзвездной среде было вначале весьма неоднородным, но со временем неоднородность уменьшалась, а средняя металличность росла [6, 7, 16, 17, 19].

Далее в параграфе показано, что в спектральном диапазоне F нижние огибающие главной последовательности (ГП) групп звезд галактического диска с разной металличностью совпадают между собой. Если предположить, что влияние металличности на положение ГП компенсируется влиянием

содержания гелия, то содержание гелия должно меняться с изменением содержания тяжелых элементов как $\Delta Y \approx 1/3 \Delta \lg Z$. Сделан вывод, что, ввиду противоречия столь сильной зависимости ΔY от ΔZ непосредственным определениям содержания гелия в горячих звездах, объяснение этого эффекта следует искать в поведении других параметров звездных атмосфер. Свойства звезд ГП в спектральном диапазоне позднее G3, по-видимому, отличаются от свойств звезд ГП в диапазоне F2 – G3: при одинаковой металличности у них узкая главная последовательность, а положения нижних огибающих зависят от металличности [2, 5, 9, 10, 17, 19].

В этом же параграфе обращено внимание на парадоксы F-G-карликов и G-K-гигантов [8, 11, 16, 17, 19], заключающиеся в том, что при одинаковой металличности F-карлики близки по кинематике к G-гигантам, а G-карлики – к K-гигантам. В целом F-карлики с $[Fe/H] < -0.1$, являясь химически более «старыми», чем G-карлики с $[Fe/H] > -0.1$, по кинематике оказываются моложе их. Тот же парадокс обнаруживается при сравнении G- и K-гигантов. Эти результаты можно объяснить, предположив, что звезды рождались из неоднородной по химическому составу среды с растущей со временем средней металличностью. В этом случае при данной металличности среди холодных звезд будут как старые, так и молодые, а старые горячие звезды должны уже уйти с ГП. G-гиганты в рамках этой модели образуются из более молодых F-карликов с уменьшенной металличностью, а K-гиганты – из более старых G-карликов с увеличенной металличностью.

В параграфе приведено также свидетельство того, что эволюция межзвездного вещества, из которого образовались впоследствии рассеянные скопления, существенно отличалась от эволюции всего остального протодискового межзвездного вещества [15, 19].

В последнем параграфе главы по той же выборке F-звезд диска исследованы параметры эллипсоидов скоростей [20, 22]. Показано, что величины всех трех полуосей эллипсоидов систематически увеличиваются с уменьшением как температуры (при постоянной металличности), так и металличности (при

постоянной температуре), причем самые большие и довольно близкие величины полуосей наблюдаются у самых малометаллических подгрупп звезд разных температур, а самые маленькие – у самых горячих и металлических. В итоге оказывается, что в дисковой подсистеме Галактики каждый из трех групповых параметров - температура, металличность и дисперсия скоростей – для F-звезд является статистическим индикатором возраста. Обнаружено, что с увеличением возраста звездной группы их эллипсоиды скоростей принимают все более равновесную форму, а направления их больших полуосей приближаются к направлению на центр Галактики, и для самых старых звезд отклонение вертекса равно нулю. Дисперсия peculiar скоростей звезд диска демонстрирует при этом излом зависимости « σ_v - [Fe/H]» в точке, соответствующей середине распределения звезд диска по металличности, и если в малометаллическом диапазоне с ростом [Fe/H] дисперсия уменьшается, то в металлическом она остается постоянной для всех температурных диапазонов.

Эллипсоиды скоростей подтвердили существование парадокса среди звезд диска, в частности, с увеличением «химического» возраста (то есть с уменьшением металличности) угловой момент F-звезд растет, а с увеличением «температурного» возраста (то есть с уменьшением температуры) – падает, в итоге наибольшую скорость Солнце имеет относительно центроида звезд с такой же, как у него, металличностью и температурой.

Во второй главе исследуются зависимости химических и кинематических параметров F-звезд тонкого диска от их возраста на основе уже не групповых, а индивидуальных значений возраста и элементов галактических орбит звезд.

В первом параграфе описан разработанный экспресс-метод для массового компьютерного определения возрастов звезд по теоретическим изохронам [25]. По Новым Йельским изохронам определены возрасты примерно 3500 F-звезд поля, лежащих в окрестности 80 пк от Солнца [30]. Построена диаграмма «возраст - металличность» для звезд диска. Показано, что средняя металличность и дисперсия металличности в первые несколько миллиардов лет формирования дисковой подсистемы остаются практически постоянными.

Однако около (4 – 5) млрд. лет назад у новых поколений звезд средняя металличность начинает монотонно расти, а дисперсия металличности непрерывно уменьшаться. Обнаружено также систематическое различие поведения дисперсий пекулярных скоростей звезд разной металличности в зависимости от возраста.

Далее в работе обнаружено различие зависимостей от возраста параметров эллипсоидов скоростей F-звезд разной металличности [26]. При этом, с увеличением возраста у металличных ($[Fe/H] > -0.1$) звезд форма эллипсоидов скоростей становится более равновесной, величины полуосей быстро растут, отклонения вертекса, уменьшаясь, стремятся к нулю, а апекс Солнца разворачивается, приближаясь к направлению галактического вращения. У менее же металличных звезд с увеличением возраста форма эллипсоида скоростей практически не меняется, оставаясь приблизительно равновесной, величины полуосей растут незначительно, отклонение вертекса уменьшается, как и у металличных звезд, а направление апекса Солнца не обнаруживает систематического изменения. Одновременно выявлено, что во всем, характерном для диска, диапазоне металличности степенному закону подчиняется зависимость от возраста только величины большой полуоси эллипсоида скоростей звезд (показатель степени равен 0.45 ± 0.05), тогда как средняя и малая полуоси (а также большая для возрастов > 1 млрд. лет) аппроксимируются прямыми линиями. Перечисленные свойства приводят к следующим выводам: а) релаксационные процессы в диске не играют определяющей роли, и кинематика звезд зависит, в основном, от динамического состояния межзвездного газа на момент их образования; б) динамическое состояние межзвездной среды в каждый момент времени неоднородно и звезды разной металличности рождаются в разных областях.

В третьем параграфе второй главы исследовано изменение с возрастом величин радиальных и вертикальных градиентов металличности в тонком диске [23, 26, 27, 28]. Для 1630 звезд созданного каталога фундаментальных астрофизических параметров близких F-звезд диска, имеющих измеренные

лучевые скорости, вычислены компоненты пространственных скоростей и элементы галактических орбит на основе модели Галактики, содержащей балдж, диск и протяженное гало [30]. Показано, что эксцентриситет, апогалактический радиус орбиты и максимальное удаление звезды от плоскости Галактики коррелируют с возрастом и поэтому могут служить в тонком диске его статистическими индикаторами. Обнаружено, что величины обоих градиентов металличности систематически уменьшаются с переходом к более старым звездам.

В следующем параграфе по данным полной выборки (генеральной совокупности) F-звезд в окрестностях 50 пк от Солнца исследована вертикальная пространственная структура подсистем звезд разного возраста и металличности [29, 31]. Найдено, что плоскость галактического диска лежит на расстоянии $-(9 \pm 2)$ пк от Солнца в направлении Южного галактического полюса, а составляющая плотности в плоскости диска, обеспечиваемая звездами F0 - F9, равна $0.0035 M_{\odot} \text{ пк}^{-3}$. На основе вычисления вероятности нахождения звезд в разных участках орбиты разработан метод статистического восстановления реального распределения по высоте различных объектов на солнечном галактоцентрическом расстоянии и с его помощью определена шкала высоты подсистемы F-звезд диска, которая оказалась 160 ± 10 пк. Показано, что в процессе эволюции дисковая подсистема в целом становится более плоской, но в каждый момент времени концентрация к плоскости Галактики у металлических ($[Fe/H] \geq -0.13$) звезд значительно выше, чем у малометаллических. Сделано предположение, что большие размеры подсистемы малометаллических звезд поддерживаются падением на диск бедного металлами газа из внешних областей Галактики.

В пятом параграфе на базе восстановленного статистическим методом реального распределения по высоте F-звезд на солнечном галактоцентрическом расстоянии построены и исследованы свойства функций металличности звезд диска разного возраста [32]. Показано, что на высоком уровне статистической значимости аппроксимация одной нормалью функции металличности звезд

любого возраста отвергается против альтернативы описания ее суммой двух нормальных кривых с центрами в $\langle [Fe/H] \rangle \approx -0.2$ и 0.0 . При этом максимум распределения звезд моложе 3 млрд. лет находится вблизи солнечной металличности, а у более старых звезд он попадает в область второго выделенного значения металличности.

В третьей главе исследованы свойства старейших объектов Галактики – шаровых звездных скоплений и переменных звезд типа RR-Лиры поля.

В первом параграфе по опубликованным данным составлен каталог однородных фундаментальных астрофизических параметров для 145 шаровых скоплений Галактики. На основе данного каталога исследованы связи между химическим составом, строением горизонтальной ветви, пространственным положением, элементами орбит, возрастом и другими физическими параметрами шаровых скоплений [33, 34, 36]. Показано, что население шаровых скоплений не является однородным и делится провалом на функции металличности при $[Fe/H] = -1.0$ на две дискретные группы с четкими максимумами при $[Fe/H] = -1.60 \pm 0.03$ и -0.60 ± 0.04 . Одновременно, при переходе через пограничное значение металличности скачком меняются средние величины и дисперсии пространственно-кинематических параметров. В итоге оказалось, что малометаллические скопления занимают в пространстве приблизительно сферический объем, заметно концентрируясь к центру Галактики. Население металлических скоплений (подсистема толстого диска), демонстрируя значительно меньшие размеры, концентрируется не только к центру, но и к плоскости Галактики, имеет значительную скорость вращения ($V_{вр} = 165 \pm 28$ км/с), значимый отрицательный вертикальный градиент металличности, в среднем является самым молодым и состоит только из скоплений с экстремально красными горизонтальными ветвями.

Новые обширные данные нашего каталога подтвердили известный результат, что население малометаллических шаровых скоплений также является неоднородным и, в свою очередь, делится на две группы по строению горизонтальной ветви. Подсистема скоплений с экстремально голубыми

горизонтальными ветвями в среднем оказалась самой старой в Галактике. Она занимает сфероидальный объем радиусом примерно 9 кпк, имеет большую скорость вращения ($V_{вр} = 77 \pm 33$ км/с) и небольшие равные по величине отрицательные радиальный и вертикальный градиенты металличности (подсистема старого «собственного» гало). Население скоплений с горизонтальными ветвями промежуточного типа занимает галактоцентрический эллипсоидальный объем с большой полуосью ≈ 19 кпк и малой полуосью ≈ 10 кпк, направленной вдоль оси, перпендикулярной к Z и лежащей под углом $\approx 30^\circ$ к X -координате. В среднем это население несколько моложе скоплений «собственного» гало и образует подсистему «аккрецированного» гало. Оно обнаруживает величины градиентов металличности примерно такие же, как в «собственном» гало. В результате на данном галактоцентрическом расстоянии и расстоянии от галактической плоскости средняя металличность скоплений «аккрецированного» гало систематически на $\Delta[Fe/H] \approx 0.3$ выше. Подсистема «аккрецированного» гало содержит большое количество скоплений с ретроградными орбитами, поэтому скорость ее вращения мала и находится с большой неопределенностью ($V_{вр} = -23 \pm 54$ км/с).

Определены характерные параметры всех выделенных подсистем и средние характеристики входящих в них шаровых скоплений. Приводятся доказательства различной природы скоплений толстого диска и «собственного» гало с одной стороны, и «аккрецированного» гало, с другой: скопления первых двух подсистем генетически связаны с Галактикой, тогда как подсистема «аккрецированного» гало состоит из скоплений, захваченных Галактикой в разное время. Проведена определенная работа по сбору и анализу данных и определению однородных «изохронных» возрастов для значительного числа шаровых скоплений. Найдено, что возрасты скоплений генетически связанных подсистем различаются: скопления «собственного» гало старше и образовались практически одновременно, а в толстом диске для этого потребовалось по крайней мере более одного миллиарда лет. Разрыв в возрастах между

подсистемами если и есть, то он может быть завуалирован ошибками определения возрастов. Данные демонстрируют, что обогащение тяжелыми элементами и коллапс межзвездной среды протогалактики произошли в основном в период между формированием подсистем «собственного» гало и толстого диска.

Важным для понимания природы предположительно аккрецированных шаровых скоплений явилось обнаружение увеличения доли маломассивных скоплений с удалением от галактического центра. В итоге показано, что средние массы аккрецированных скоплений уменьшаются с увеличением галактоцентрического расстояния. Одновременно они демонстрируют положительную корреляцию между возрастом и массой. У генетически связанных скоплений Галактики обе корреляции полностью отсутствуют. Высказано предположение, что маломассивные и одновременно сравнительно молодые шаровые скопления образуются преимущественно в карликовых галактиках низкой массы, которые, даже находясь на довольно больших расстояниях от галактического центра, теряют свои скопления под действием приливных сил Галактики.

Во втором параграфе главы продолжено исследование характерных параметров старых галактических подсистем по звездам поля [35, 36, 38]. По опубликованным прецизионным наземным и спутниковым измерениям собственных движений, компилятивным лучевым скоростям и фотометрическим расстояниям вычислены компоненты пространственных скоростей и элементы галактических орбит для 174 переменных звезд типа RR Лиры околосолнечной окрестности. На основе вычисленных элементов орбит и опубликованных обилий тяжелых элементов исследована связь между химическими, пространственными и кинематическими характеристиками лирид поля. Обнаружены скачкообразные изменения пространственно-кинематических характеристик звезд при переходах через пограничное значение металличности ($[Fe/H] \approx -0.95$) и через критическое значение полной остаточной скорости относительно локального центроида ($V_{ост} \approx 290$ км/с),

свидетельствующие о том, что все население звезд RR Лиры не является однородным, а состоит, по крайней мере, из трех подсистем, различающихся занимаемым объемом в Галактике.

На основании совпадения характерных параметров соответствующих подсистем у лирид поля и шаровых скоплений, сделан вывод, что металлические звезды и шаровые скопления являются составляющими быстро вращающейся и весьма сплюснутой галактической подсистемы толстого диска, обладающего значимым отрицательным вертикальным градиентом металличности. Менее металлические объекты, в свою очередь, делятся на два типа населений, но критерии при этом для звезд и скоплений различаются. Полагается, что малометаллические звезды поля с остаточными скоростями относительно локального центроида меньше критического значения и скопления с экстремально голубыми горизонтальными ветвями образуют генетически связанную с толстым диском сферическую, медленно вращающуюся подсистему «собственного» гало с незначительными, но отличными от нуля радиальным и вертикальным градиентами металличности. Размеры подсистем, оцененные по апогалактическим радиусам орбит звезд поля, оказались примерно одинаковыми. Быстрые звезды поля и скопления с более красными горизонтальными ветвями образуют сфероидальную подсистему «аккрецированного» гало, примерно в три раза большего размера, чем две предыдущие. Полное отсутствие в ней градиентов металличности, преимущественно вытянутые орбиты, большое число звезд с обратным галактическому вращению и относительно малые значения возраста подтверждают гипотезу о внегалактическом происхождении объектов ее составляющих.

Четвертая (важнейшая) глава диссертации посвящена исследованию относительных содержаний магния (α -элемент) и европия (элемент r-процесса) в ближайших F-G-звездах с целью восстановления этапов формирования и эволюции галактических подсистем.

В первом параграфе описано составление сводного каталога эффективных температур, ускорений силы тяжести, содержаний железа и магния в атмосферах, а также расстояний, компонентов скоростей и элементов орбит звезд околосолнечной окрестности [40]. Параметры атмосфер и содержания железа получены усреднением опубликованных соответствующих величин, определенных методом синтетического моделирования спектров, на основе 1809 определений в 35 публикациях. Относительные содержания магния получены для 867 карликов и субгигантов в результате специально разработанной трехходовой итерационной процедуры усреднения с присвоением веса, как каждому первоисточнику, так и каждому индивидуальному определению, при этом учитывались систематические смещения всех шкал относительно приведенной средней шкалы. Предполагаемая полнота охвата первоисточников с объемом более 5 звезд на декабрь 2003 года более 90%. Для 77 звезд нашего каталога однородные относительные содержания европия взяты из публикаций одного автора. Компоненты пространственных скоростей для абсолютного большинства звезд каталога определены по данным наземных и спутниковых высокоточных астрометрических и спектроскопических наблюдений, а элементы галактических орбит вычислены на основе трехкомпонентной модели Галактики, состоящей из диска, балджа и массивного протяженного гало.

Данные сводного каталога карликов и субгигантов поля использованы для сегрегации по кинематическим критериям объектов тонкого диска, толстого диска и галактического гало, а также идентификации среди них предположительно аккрецированных звезд. Исследованы связи относительных содержаний магния в звездах всех выделенных подсистем с их металличностью, элементами галактических орбит и возрастом.

Во втором параграфе, посвященном толстому диску [41], показано, что относительные содержания магния в звездах подсистемы лежат в диапазоне ($0.0 < [\text{Mg}/\text{Fe}] < 0.5$) и уменьшаются с ростом металличности, начиная от точки $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.0$, тогда как массовое образование звезд в подсистеме началось при

$[Fe/H] \approx -1.25$. Это интерпретируется в пользу большой длительности процесса звездообразования в толстом диске. Обнаружены значимые вертикальные градиенты металличности и относительного содержания магния, которые могут присутствовать в подсистеме только в случае формирования ее в условиях медленного коллапса протогалактики. Однако градиенты в толстом диске исчезают, если из выборки исключить звезды, орбиты которых лежат в галактической плоскости, но имеют большие эксцентриситеты и малые азимутальные компоненты пространственной скорости, нехарактерные для звезд тонкого диска. Такие звезды можно рассматривать как отдельное население в подсистеме. Если эти два населения образовались в результате независимых процессов, то весьма актуальной становится модель формирования толстого диска в результате неоднократного взаимодействия ранней Галактики с другими массивными галактиками.

Большой разброс относительных содержаний магния ($-0.3 < [Mg/Fe] < 0.5$) у звезд малометалличного "хвоста" толстого диска, составляющих в подсистеме $\approx 8\%$, свидетельствует о том, что они образовались внутри изолированных межзвездных облаков, слабо взаимодействовавших с веществом единого протогалактического облака. В пользу последнего предположения говорит и тот факт, что среди звезд с кинематикой толстого диска присутствуют звезды движущейся группы Арктюра, предположительно попавшие в Галактику из распавшейся довольно массивной галактики-спутника. В параграфе доказывається генетическая связь звезд в выделенной группе и освещается история звездообразования в ее родительской карликовой галактике.

В толстом диске обнаружен значимый отрицательный радиальный градиент относительного содержания магния вместо ожидаемого положительного. Предполагаемой причиной инверсии градиента являются, по-видимому, меньшие перигалактические радиусы орбит и большие эксцентриситеты у более богатых магнием звезд среди других, находящихся в данный момент в небольшом объеме пространства Галактики вблизи Солнца. Аналогичная, но статистически менее достоверная инверсия наблюдается в подсистеме и для

радиального градиента металличности. Обсуждается временная шкала формирования толстого диска.

В третьем параграфе исследуется содержание магния в тонком диске [44]. Показано, что в его звездах отношения $[Mg/Fe]$ при любом значении металличности в диапазоне $(-1.0 < [Fe/H] < -0.4)$ меньше, чем в толстом диске. Из этого следует, что звезды тонкого диска в среднем моложе звезд толстого диска. Обнаружено, что у таких малометаллических звезд тонкого диска относительные содержания магния систематически уменьшаются с увеличением радиусов их орбит так, что повышенные его содержания ($[Mg/Fe] > 0.2$) наблюдаются практически только у звезд, орбиты которых почти целиком лежат внутри солнечного круга. Одновременно с этим, у бедных магнием звезд при увеличении радиусов их орбит наблюдается перемещение диапазона металличности от $(-0.5 < [Fe/H] < +0.3)$ до $(-0.7 < [Fe/H] < +0.2)$. Такое поведение свидетельствует, во-первых, о том, что скорость звездообразования уменьшается с увеличением галактоцентрического расстояния, а во-вторых, о том, что за пределами солнечного круга звездообразование какое-то время отсутствовало, тогда как внутри него этот процесс проходил непрерывно.

Тренд скорости звездообразования вдоль галактоцентрического расстояния явился причиной существования в диске отрицательного радиального градиента металличности, который обнаруживает тенденцию к возрастанию с уменьшением возраста. При этом радиальный градиент относительного содержания магния не прослеживается. Обнаружен значительный положительный вертикальный градиент относительного содержания магния и подтверждено существование большого отрицательного вертикального градиента металличности, причем оба градиента заметно увеличиваются по абсолютной величине с уменьшением возраста.

Обнаружено, что в тонком диске существует не только связь между возрастом и металличностью, но и между возрастом и содержанием магния. Обсуждены этапы формирования подсистемы. Высказано предположение, что

структура тонкого диска многокомпонентна, но в ближайших окрестностях Солнца надежно отождествить звезды разных его компонентов не позволяет тренд скорости звездообразования вдоль галактического радиуса.

В четвертом параграфе исследована сферическая подсистема [39, 43, 45]. Показано, что аккрецированные звезды составляют большинство в галактическом гало. Они попали в Галактику из распадающихся карликовых галактик-спутников. Исследована связь относительных содержаний магния и европия с металличностью, элементами галактических орбит и возрастом звезд собственного и аккрецированного гало. Показано, что во всех предположительно аккрецированных звездах отношения содержаний европия к магнию резко отличаются от их отношений в звездах, генетически связанных с Галактикой. Согласно современным представлениям, европий образуется главным образом в маломассивных SNeII тогда как магний синтезируется в больших количествах в предсверхновых звездах II типа больших масс. Поскольку все старые малометаллические аккрецированные звезды нашей выборки обнаруживают значительный избыток европия относительно магния, делается вывод, что максимальные массы предсверхновых SNeII за пределами ранней Галактики были много меньше, чем внутри нее. Низкие же отношения $[Eu/Mg] < 0$ демонстрирует лишь небольшое количество аккрецированных звезд, причем только более молодых, что можно объяснить некоторой задержкой первичного звездообразования и вспышками впоследствии массивных сверхновых типа II в относительно небольшой части внегалактического пространства.

Обнаружено уменьшение отношения $[Eu/Mg]$ с увеличением $[Fe/H]$ у генетически связанных звезд, свидетельствующее, что в Галактике, сформированной из единого протогалактического облака, максимальная масса предсверхновых SNeII со временем увеличивалась одновременно с ростом средней металличности.

Далее показано, что относительные содержания магния у звезд «собственного» гало практически не зависят от металличности и лежат в

довольно узком диапазоне, тогда как предположительно аккрецированные звезды демонстрируют очень большой разброс относительных содержаний магния, вплоть до отрицательных значений $[Mg/Fe]$. Такое поведение звезд «собственного» гало свидетельствует о том, что на стадии его формирования межзвездное вещество в ранней Галактике было достаточно однородно по химическому составу. Обнаружено смещение средней металличности бедных магнием ($[Mg/Fe] < 0.2$) предположительно аккрецированных звезд в отрицательную сторону при переходе от медленно вращающихся вокруг галактического центра звезд ($|\Theta| < 50$ км/с) к наиболее быстро вращающимся на $\Delta[Fe/H] \approx -0.5$. Одновременно с ростом абсолютного значения $|\Theta|$ увеличиваются также и средние значения апогалактических радиусов и наклоны орбит и уменьшаются их эксцентриситеты. В итоге в аккрецированном гало наблюдаются отрицательные и радиальный и вертикальный градиенты относительных содержаний магния, а корреляции между отношениями $[Mg/Fe]$ и другими элементами галактических орбит у аккрецированных и у генетически связанных звезд Галактики противоположны по знаку. Выдвинуто предположение, что при уменьшении масс карликовых галактик в них одновременно уменьшаются и максимальные массы сверхновых SNe II, а следовательно, и выход α -элементов. В этом случае обнаруженная в данной работе связь отношений $[Mg/Fe]$ с наклоном и размером орбит у аккрецированных звезд оказываются в полном согласии с результатами численного моделирования динамических процессов при взаимодействии галактик. В итоге поведение содержания магния в аккрецированных звездах свидетельствует, что достаточно массивные галактики-спутники начинают разрушаться и в массовом порядке терять свои звезды только после того, как динамическое трение существенно уменьшит в размерах и переместит их орбиты практически в плоскость Галактики. При этом менее массивные галактики-спутники начинают разрушаться еще до того, как их орбиты заметно изменятся под действием приливных сил.

В этом же параграфе исследуется химический состав звезд движущейся группы шарового скопления ω Центавра, захваченными Галактикой из разрушенной довольно массивной карликовой галактики-спутника. На основе характера изменения отношений $[Mg/Fe]$ с металличностью обсуждается история звездообразования в этой группе.

В заключении перечислены основные результаты и сформулированы выводы работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих статьях:

1. Марсаков В.А., Сучков А.А., Шевелев Ю.Г. Химический состав F-звезд околосолнечной окрестности. // Астрон. Журн. - 1984. - Т.61. - С.483-490
2. Шевелев Ю.Г., Сучков А.А., Марсаков В.А. О содержании гелия в F-звездах диска. // Астрон. Цирк. - 1985. - № 1372. - С.1-3
3. Марсаков В.А., Шевелев Ю.Г. Каталог определений металличности, компонентов скоростей и элементов орбит F5-K5 карликов в окрестности 80 парсек от Солнца. // Научн. информ. Астросовета АН СССР - 1986. - № 59. - С.61-63
4. Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А. Каталог определений $[Fe/H]$, расстояний, компонентов скоростей и элементов орбит F-звезд южного галактического полюса. // Научн. информ. Астросовета АН СССР. - 1986. - № 59. - С.67-69
5. Марсаков В.А., Сучков А.А., Шевелев Ю.Г. О содержании гелия в звездах диска и скоплениях Гиады и Кома. // в «Звездные скопления». Свердловск, 1987, Материалы научн. конф. - 1987а. - С.40-44
6. Марсаков В.А., Сучков А.А., Шевелев Ю.Г. Обнаружение точки поворота F-звезд поля. Возраст диска Галактики. // Астрон. Цирк. - 1987б. - № 1485. - С.1-3
7. Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А., Сучков А.А. Связь между возрастом, кинематикой и металличностью F-звезд диска Галактики. // Астрон. Цирк. - 1987. - № 1486. - С.1-3

8. Сучков А.А., Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А. Парадокс соотношения кинематика - металличность для звезд диска Галактики. // Астрон. Цирк. - 1987 - № 1501. - С.1-3
9. Шевелев Ю.Г., Сучков А.А., Марсаков В.А. Ширина главной последовательности: роль эффектов возраста, металличности и содержания гелия. // Астрон. Цирк. - 1987а. - № 1514. - С.1-2
10. Шевелев Ю.Г., Сучков А.А., Марсаков В.А. Содержание гелия и светимость F-звезд главной последовательности по данным фотометрической системы uvby β . // Астрон. Журн. - 1987б. - Т.64. - С.747-755
11. Марсаков В.А., Сучков А.А., Шевелев Ю.Г. Загадка несоответствия между кинематическим и изохронным возрастом F-звезд. // Астрон. Цирк. - 1988. - № 1533. - С.9-10
12. Марсаков В.А., Шевелев Ю.Г. Шкала расстояний, покраснения и пространственные вариации металличности F-звезд в окрестности Солнца. // Астрон. Журн. - 1988. - Т.65. - С.918-926
13. Marsakov V.A., Shevelev Yu.G. The catalogue of metallicities, velocity components, and orbital parameters for F2-K5 dwarfs in the vicinity of 80 pc from the Sun. // Bull. Inform. CDS. - 1988. - № 35. - P.129-130
14. Shevelev Yu.G, Marsakov V.A The catalogue of metallicities, distances, velocity components, and parameters of orbits for F stars of the southern sky. // Bull. Inform. CDS. - 1988. - № 35. - P.131-133
15. Сучков А.А., Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А. Из чего рождаются рассеянные скопления? // Астрон. Цирк. - 1989. - № 1536. - С.13-14
16. Шевелев Ю.Г. Марсаков В.А., Сучков А.А. Связь между кинематикой, химическим составом и возрастом F-G звезд диска Галактики. // Астрон. Журн. - 1989. - Т.66. - С.317-327
17. Сучков А.А., Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А. Структура "главной последовательности" F-G-звезд: эффекты возраста, металличности и содержания гелия. // Астрон. Журн. - 1989. - Т.66. - С.1227-1238

18. Марсаков В.А., Шевелев Ю.Г. Каталог физических характеристик F-звезд главной последовательности в окрестности 80 пк от Солнца. // Астрон. Цирк. - 1990. - № 1545. - С.11-12
19. Marsakov V.A., Suchkov A.A., Shevelev Yu.G. F-stars: evidence for "two-dimensional" age-metallicity relation and a new light on the enrichment history of the Solar neighbourhood. // Astrophys. and Space Sci. - 1990. - V.172. - P.51-75.
20. Марсаков В.А. Инверсия зависимости между металличностью и круговой скоростью F-звезд диска Галактики. // Астрон. Цирк. - 1991. - № 1548. - С.9-10
21. Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А. Каталог физических и кинематических параметров A-звезд главной последовательности в окрестности 80 пк от Солнца. // Астрон. Цирк. - 1991. - № 1548. - С.41-4222.
22. Марсаков В.А. Связь параметров эллипсоидов скоростей F-звезд с их металличностью, температурой и возрастом. // Астрон. Журн. - 1992а. - Т.69. - С.1015-1027
23. Марсаков В.А. Эволюция радиального градиента металличности в галактическом диске. // Астрон. Цирк. - 1992б. - № 1553. - С.17-18
24. Марсаков В.А., Шевелев Ю.Г. О релаксации в галактическом диске. // Астрон. Цирк. - 1993. - № 1554. - С.7-8
25. Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А. Изохронные возрасты близких F-звезд и связь между возрастом и металличностью в галактическом диске. // Астрон. Журн.. - 1993. - Т.70. - С. 1218-1227
26. Марсаков В.А., Шевелев Ю.Г. Различие зависимостей параметров эллипсоидов скоростей металлических и малометаллических F-звезд диска от возраста и проблема релаксации. // Астрон. Журн. - 1994. - Т.71. - С.368-376
27. Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А. Эксцентриситеты орбит звезд как статистический индикатор возраста в галактическом диске. // Астрон. Цирк. - 1994. - № 1556. - С.9-10

28. Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А. Изменение радиального и вертикального градиентов металличности в галактическом диске с возрастом. // Астрон. Журн. - 1995 - Т.52. - С.321-332
29. Марсаков В.А., Шевелев Ю.Г. Вертикальная структура галактического диска в окрестности Солнца. // Астрон. Журн. - 1995. - Т.72. - С.630-640
30. Marsakov V.A., Shevelev Yu.G. The catalogue of metallicities, orbital elements, and other parameters for nearby F-stars. // Bull. Inform. CDS. - 1995. - № 47. - P.13-15
31. Marsakov V.A. Shevelev Yu.G. Scale-height for the galactic disk subsystems being different in age and metallicity. // in "Structure and evolution of stellar system." Int. Conf. held in Petrozavodsk, Russia, 15 - 23 Aug. 1995. Eds. Agecian Y.A., Mullari A.A., Orlov V.V. - Saint Petersburg. - 1997. - P.150-154
32. Shevelev Yu.G., Marsakov V.A. On properties of metallicity function of F-stars in the galactic disk. // Bull. Spec. Astrophys. Obs.- 1998. - V.46. - P.101-109
33. Боркова Т.В., Марсаков В.А. Подсистемы шаровых скоплений Галактики. // Астрон. Журн. – 2000а. - Т.77. - С.750-772
34. Borkova T.V., Marsakov V.A. "Scenario of Early history of the Milky Way on genetic bound globular clusters" // in «Variable stars - key to understanding a structure and evolutions of the Galaxy» Astron., Soc. Conf. held in Moscow. - 23 - 29 Okt. 1999. Eds. Samus N.N., Mironov A.V. – Nizniy Arhys. - 2000б. - P.193-196
35. Боркова Т.В., Марсаков В.А. Подсистемы переменных звезд типа RR Лиры нашей Галактики. // Астрон. Журн. – 2002а. - Т.79. - С.510-525
36. Marsakov V.A., Borkova T.V. Subsystems of the Galactic halo, their structures and compositions. // Odessa Astron. Publ. - 2002. - V.15. - P.52-60
37. Borkova T.V., Marsakov V.A. Distant globular clusters with anomalously small masses. // Bull. Spec. Astrophys. Obs. – 2002б. - V.54. - Т.61-65
38. Borkova T.V., Marsakov V.A. Two populations among the metal-poor field RR Lyrae stars. // Astron. Astrophys. - 2003. - V.398. - P.133-139

39. Боркова Т.В., Марсаков В.А. Звезды внегалактического происхождения в окрестности Солнца. // Письма в Астрон. Журн.- 2004. - Т.30. - С.173–184
40. Боркова Т.В., Марсаков В.А. Сводный каталог спектроскопических определений содержаний химических элементов в звездах с точными параллаксами. Магний. // Астрон. Журн. – 2005а. - Т.82. - С.453-465
41. Марсаков В.А., Боркова Т.В. Формирование подсистем Галактики в свете содержания магния в звездах поля. Толстый диск. // Письма в Астрон. Журн.- 2005а. - Т.31. - С.577–591
42. Borkova T.V., Marsakov V.A. About compiled catalogue of spectroscopic determined chemical abundances for stars with accurate parallaxes. Magnesium. // In: From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution, IAU Symposium Proceedings of the international Astronomical Union 228, Held in Paris, France, May 23-27, 2005. Edited by Hill, V.; François, P.; Primas, F. Cambridge: Cambridge University Press, - 2005b. - P.241-242
43. Marsakov V.A., Borkova T.V. Solar Vicinity: Star of Extragalactic Origin. // In: From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution, IAU Symposium Proceedings of the international Astronomical Union 228, Held in Paris, France, May 23-27, 2005. Edited by Hill, V.; François, P.; Primas, F. Cambridge: Cambridge University Press, - 2005b. - P.543-544
44. Марсаков В.А., Боркова Т.В. Формирование подсистем Галактики в свете содержания магния в звездах поля. Тонкий диск. // Письма в Астрон. Журн.- 2006а. - Т.32. - С. 419-437
45. Марсаков В.А., Боркова Т.В. Формирование подсистем Галактики в свете содержания магния в звездах поля. Гало. // Письма в Астрон. Журн. - 2006б. - Т.32. - С. 545-556