

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Южный федеральный университет»
Научно-исследовательский институт физики

На правах рукописи

УДК 524.62-34, 524.6

КОВАЛЬ Вера Васильевна

**КИНЕМАТИКА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ
ЗВЕЗД ПОЛЯ ТОНКОГО ДИСКА ГАЛАКТИКИ**

(01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор В.А. Марсаков

Ростов-на-Дону – 2014

Оглавление

Введение	4
1 Связь параметров эллипсоидов скоростей звезд галактического диска с возрастом и металличностью	14
1.1 Введение	14
1.2 Наблюдательные данные	17
1.3 Составление репрезентативной выборки звезд тонкого диска	19
1.4 Сравнение параметров эллипсоидов скоростей, вычисленных по разным выборкам звезд тонкого диска	26
1.5 Эллипсоиды скоростей звезд разной металличности	30
1.6 Итоги первой главы	37
2 Эволюция эллипсоидов скоростей в тонком диске галактики и радиальная миграция звезд	41
2.1 Введение	41
2.2 Наблюдательные данные	43
2.3 Зависимость параметров эллипсоидов скоростей звезд смешанного возраста и металличности от средних радиусов их орбит	43
2.4 Зависимости апекса солнечного движения и углового момента для звезд с разными средними радиусами орбит от металличности	47
2.5 Зависимости параметров эллипсоидов скоростей звезд с разными средними радиусами орбит от возраста	48
2.6 Зависимости от возраста параметров эллипсоидов скоростей звезд разной металличности, рожденных на разных галактоцентрических расстояниях	52
2.7 Зависимости от возраста параметров эллипсоидов скоростей звезд, рожденных на солнечном галактоцентрическом расстоянии	54
2.8 Итоги второй главы	57
3 Зависимость «возраст–металличность» в тонком диске Галактики	60
3.1 Введение	60
3.2 Наблюдательные данные	65
3.3 Анализ эффектов селекции	70
3.4 Точки поворота ГП у звезд поля разной металличности.	73
3.5 Существуют ли старые металлические звезды?	75
3.6 Влияние радиальной миграции звезд на связь между возрастом и металличностью	77
3.7 Зависимости между металличностью и возрастом для звезд тонкого диска, рожденных на разных галактоцентрических расстояниях.	78

3.8	Диаграмма «возраст–металличность» для звезд, рожденных вблизи солнечного круга.	79
3.9	Зависимости «возраст – металличность» и «возраст–относительное содержание магния»	81
3.10	Итоги третьей главы	85
4	Свойства населения классических цефеид в Галактике	87
4.1	Введение	87
4.2	Исходные данные	88
4.3	Статистические связи между различными характеристиками	92
4.4	Зависимости относительных содержаний различных химических элементов от металличности	96
4.5	Связь относительных содержаний химических элементов разных процессов с другими параметрами	102
4.6	Итоги четвертой главы	109
	Заключение	113
	Литература	116

Введение

Актуальность темы исследования

Восстановление химической и динамической эволюции Галактики является одной из актуальнейших задач современной астрофизики. Продолжительность существования подсистемы тонкого галактического диска сопоставимо с возрастом самой Галактики, поэтому мы можем попытаться отследить изменение с возрастом как кинематики составляющих его звезд, так и их химического состава. Скорости звезд разного возраста несут в себе информацию о динамических процессах, происходивших в подсистеме, тогда как химический состав – о процессах обогащения тяжелыми элементами межзвездной среды, из которой эти звезды впоследствии образовались. Именно поэтому звезды поля выбраны нами в качестве основного предмета исследования. В первую очередь это долгоживущие F–G-карлики, которые составляют абсолютное большинство среди близких звезд и для которых возможно проведение трехмерной классификации исключительно по фотометрическим данным. Это позволяет малыми затратами наблюдательного времени получать необходимые данные для большого числа звезд. Поскольку различные химические элементы синтезируются в звездах разных масс и выбрасываются в межзвездную среду на разных временах, по их содержаниям в атмосферах новых поколений звезд можно отследить историю звездообразования в галактическом диске. Наряду с F–G-карликами и гигантами с их широким разбросом возрастов, весьма информативными оказываются массивные звезды – цефеиды. Хотя эти звезды и находятся на продвинутой стадии своей эволюции, но химический состав их атмосфер для большинства химических элементов не претерпел заметных изменений. Благодаря своей молодости эти звезды недалеко ушли от мест своего рождения, поэтому по ним можно судить не только о недавних этапах звездообразования, но и о степени однородности межзвездного вещества.

Для выявления новых и уточнения уже известных в тонком галактическом диске закономерностей одним из наиболее надежных методов

является комплексный статистический анализ химических, физических и пространственно–кинематических характеристик звезд поля. Для его проведения необходимо иметь большой набор качественных звездных данных. Поскольку в последнее время появились весьма надежные глубокие обзоры звезд с астрометрическими, спектральными и фотометрическими данными, такие исследования в настоящее время являются особенно актуальными.

Цель и задачи исследования

Целью данного исследования было выявление характера зависимостей от возраста параметров эллипсоидов скоростей и средней металличности по карликам тонкого диска, а также сравнительный анализ зависимостей от металличности относительных содержаний химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза, в цефеидах, карликах и гигантах тонкого галактического диска.

Для заявленных целей были поставлены и решены следующие задачи:

- модификация методики отбора звезд, принадлежащих тонкому галактическому диску;
- составление репрезентативной выборки F–G-карликов поля тонкого диска Галактики на основе данных Женевско–копенгагенского обзора и анализ в ней селекционных эффектов;
- разработка кодов вычисления параметров эллипсоидов скоростей звезд по различным наблюдательным данным;
- исследование свойств параметров эллипсоидов скоростей и функции металличности звезд тонкого диска;
- анализ влияния радиальных миграций звезд на ход исследуемых зависимостей;
- создание сводных каталогов спектроскопических определений содержаний различных химических элементов, в цефеидах, карликах и гигантах поля;
- сравнительный анализ содержаний химических элементов звездных населениях тонкого диска разного возраста.

Научная новизна

Все результаты диссертации, выносимые на защиту, были получены по оригинальным, корректно составленным выборкам звезд, и являются новыми.

- Модифицирована методика вычисления вероятности принадлежности звезд поля подсистеме тонкого диска Галактики, учитывающая не только кинематику, но и химический состав звезд.
- Впервые по корректно составленной выборке звезд поля тонкого диска получены зависимости дисперсии скоростей звезд от возраста и определены величины компонент скорости Солнца относительно местного стандарта покоя.
- Показано, что радиальная миграция в сочетании с отрицательным градиентом металличности в тонком диске приводит к существованию у близких звезд отрицательной корреляции между металличностью и угловым моментом.
- Обнаружено, что примерно 4 – 5 млрд. лет назад металличность в тонком диске стала монотонно увеличиваться, тогда как на начальных этапах формирования подсистемы металличность звезд практически не зависела от возраста.
- Продемонстрировано, что радиальная миграция звезд не приводит к заметному искажению хода зависимости металличности от возраста.
- Статистически достоверно показано, что в классических цефеидах поля относительные содержания всех элементов от скорости не зависят, но увеличиваются с увеличением галактоцентрического расстояния и уменьшаются с увеличением металличности как у карликов и гигантов тонкого диска. Обнаружены значимые различия в относительных содержаниях химических элементов в цефеидах, гигантах и карликах поля.

Научная и практическая значимость работы

- Написанные программы, дают возможность определять параметры эллипсоидов скоростей звезд тремя различными способами, в зависимости от имеющихся данных для звезд: по лучевым скоростям, по собственным движениям и по пространственным скоростям звезд.

- Модифицированный метод выделения одиночных звезд подсистемы тонкого диска, позволяет получить наиболее полную выборку звезд, принадлежащих данной подсистеме
- Результаты исследования можно использовать для построения модели химической и динамической эволюции тонкого галактического диска и анализа пространственного распределения химических элементов в окрестностях Солнца.
- Составленная и опубликованная выборка классических цефеид с однородными данными параметров атмосфер, содержаний ряда химических элементов, а также пространственных и кинематических параметров можно использовать как для изучения процессов внутри звезд, так и для химической эволюции галактического диска.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Вывод о том, что зависимости от возраста величин большой, средней и малой полуосей эллипсоидов скоростей, а также дисперсии полной остаточной скорости звезд тонкого диска после корректного отбора их в подсистему подчиняются степенному закону с показателями степени примерно 0.25.
2. Результат, что у близких к Солнцу звезд с уменьшением металличности скорость вращения вокруг галактического центра в среднем монотонно увеличивается, а не уменьшается и вывод о том, что за данную корреляцию ответственна радиальная миграция совместно с отрицательным градиентом металличности в тонком диске.
3. Вывод о том, что средняя металличность в первые несколько миллиардов лет формирования подсистемы тонкого диска Галактики остаётся практически постоянной, тогда как дисперсия металличности быстро уменьшается. Но примерно 4 – 5 млрд. лет назад у новых поколений звезд средняя металличность начинает монотонно возрастать при постоянной дисперсии металличности.
4. Результат, что относительные содержания всех α -элементов в цефеидах демонстрируют более низкие отношения, а элементов s - и r -процессов более высокие, чем у карликов и гигантов тонкого диска. Одновременно все перечисленные элементы и в цефеидах и в дру-

гих звездах демонстрируют уменьшение относительных содержаний с ростом металличности.

Реализация результатов работы

Результаты диссертации нашли отражение в отчетах по НИР, выполненных по планам НИИ физики и кафедры физики космоса ЮФУ, а также по грантам РНП, 02.740.11.0247,И; РНП,2.1.1/1937,И; РФФИ 11-02-00621-а,И.

Апробация результатов

Основные результаты исследования были представлены:

- на астрофизических семинарах:
 - Кафедры физики космоса и отдела космических исследований НИИ физики Южного федерального университета.
 - САО РАН.
- на международных конференциях:
 - «Chemical and dynamical evolution of Stars and Galaxies» (2008, г. Одесса, Украина).
 - «Galaxies: origin, dynamics, structure astrophysical disks» (2012, г. Сочи).
 - «13-th Odessa International Astronomical Gamov's Conference–School» (2013, г. Одесса, Украина).
- на всероссийских научных конференциях
 - XXXVI студенческая научная конференции «Физика космоса» (2007 г., г. Екатеринбург, Астрономическая обсерватория УрГУ).
 - Тринадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-13) (2007, г. Таганрог).
 - Всероссийская научная конференция «Химическая и динамическая эволюция галактик» (2009, г. Ростов-на-Дону).

- XXXIX студенческая научная конференции «Физика космоса» (2010 г., г. Екатеринбург, Астрономическая обсерватория УрГУ).
- Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр южного научного центра РАН (2010, г. Ростов-на-Дону).
- XXXX студенческая научная конференции «Физика космоса» (2011 г., г. Екатеринбург, Астрономическая обсерватория УрГУ).
- Всероссийская конференция «Галактики привычные и неожиданные» (2013, г. Ростов-на-Дону).
- Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия» (2013, г. Санкт-Петербург).

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием наиболее точных из опубликованных звездных данных;
- корректным составлением репрезентативных выборок звезд диска с объемами, достаточными для получения статистически надежных результатов;
- учетом селекционных эффектов при анализе обнаруженных закономерностей;
- сравнением получаемых результатов с опубликованными другими авторами;
- цитированием.

Личный вклад автора

Автору полностью принадлежат анализ наблюдательных данных, разработка критериев отбора звезд и составление выборок, а также разработка алгоритмов, написание и отладка всех численных кодов. Постановка задач, интерпретация полученных результатов и формулировка выводов всех работ автору принадлежит равноправно с соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 101 наименований, 24 рисунков, 3 таблиц. Общий объем диссертации 122 страницы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования; определены цели исследования; указаны научная новизна и практическая значимость; приведены положения, выносимые на защиту; отмечен личный вклад диссертанта; приведен список публикаций автора.

В первой главе на основе данных обновленной версии женево-копепгагенского каталога исследованы зависимости параметров эллипсоидов скоростей F–G- звезд тонкого диска Галактики от возраста и металличности. Показано, что зависимости от возраста величин большой, средней и малой полуосей эллипсоидов, а также дисперсии полной остаточной скорости подчиняются степенному закону с показателями степени, соответственно, 0.25, 0.29, 0.32 и 0.27 (при неопределенностях ± 0.02). Аналогичные показатели для всех близких звезд из-за присутствия среди них объектов толстого диска получаются в полтора раза больше, тогда как именно такие величины обычно пытаются объяснить, моделируя релаксационные процессы в галактическом диске. Удаление из выборки звезд наиболее многочисленных движущихся групп еще несколько уменьшает соответствующие показатели (0.22, 0.26, 0.27 и 0.24). Ограничение же выборки расстоянием 60 пк от Солнца, в пределах которого выборку звезд можно считать полной, практически не приводит к изменению ни величин параметров эллипсоидов скоростей, ни их зависимостей от возраста. Показано, что с увеличением возраста эллипсоид скоростей увеличивается в размерах, едва заметно округляет форму, похоже слегка поворачивается в направлении галактического центра и теряет угловой момент. Причем форма эллипсоида скоростей всегда остается далекой от равновесия. Одновременно продемонстрировано, что эллипсоид скоростей звезд смешанного возраста по мере уменьшения металличности увеличивается в размерах, обнаруживает слабую тенденцию к увеличению сферичности и разворачивается в направлении на галактический центр (причем при переходе через значение $[Fe/H] \approx -0.25$ эти изменения происходят заметно быстрее). Т.е. эллипсоид ведет себя подобно изменению с возрастом, но с уменьшением металличности скорость вращения вокруг галактического центра у звездных групп монотонно увеличивается, а не уменьшается. Кроме того обнаружено, что показатели степени за-

зависимостей от возраста величин полуосей зависят от металличности и демонстрируют максимум в окрестности $[Fe/H] \approx -0.1$. Причем зависимости от возраста всех параметров эллипсоидов скоростей звезд разной металличности ведут себя примерно одинаково. Высказано предположение, что возникновение в тонком галактическом диске зависимости параметров эллипсоидов скоростей от металличности обуславливается, скорее всего, радиальной миграцией звезд.

Во второй главе исследовано влияние радиальной миграции звезд на зависимости от возраста параметров эллипсоидов скоростей близких звезд в тонком диске Галактики, полагая при этом неизменными средние радиусы звездных орбит. Продемонстрировано, что именно радиальная миграция совместно с отрицательным градиентом металличности в тонком диске ответственна за наблюдаемую для близких звезд отрицательную корреляцию между их металличностью и угловым моментом, тогда как у звезд, рожденных на одинаковых галактоцентрических расстояниях, угловой момент не зависит ни от возраста, ни от металличности. По звездам, рожденным на солнечном галактоцентрическом расстоянии, показано, что компоненты скорости Солнца относительно местного стандарта покоя равны $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot})_{LSR} = (5.1 \pm 0.4, 7.9 \pm 0.5, 7.7 \pm 0.2)$ км с⁻¹. При этом обе координаты апекса солнечного движения все время остаются в пределах ошибок равными $\langle l_{\odot} \rangle = 70^{\circ} \pm 7^{\circ}$ и $\langle b_{\odot} \rangle = 41^{\circ} \pm 2^{\circ}$. Показатели степени зависимостей от возраста величин большой, средней и малой полуосей стали равными 0.26 ± 0.04 , 0.32 ± 0.03 и 0.07 ± 0.03 соответственно. В итоге оказалось, что с увеличением возраста эллипсоид скоростей звезд тонкого диска, рожденных на солнечном галактоцентрическом расстоянии, увеличивается в размерах только в плоскости диска, тогда как в перпендикулярном ему направлении остается практически неизменным. Форма его все время остается далека от равновесной, а направление его большой полуоси не меняется с возрастом – эллипсоид все время сохраняет одинаковое и в пределах неопределенностей равное нулю отклонение вертекса ($\langle L \rangle = 0.7^{\circ} \pm 0.6^{\circ}$, $\langle B \rangle = 1.9^{\circ} \pm 1.1^{\circ}$). Столь малое увеличение с возрастом дисперсии скоростей в направлении перпендикулярном галактическому диску можно, по-видимому, объяснить «разогреванием» звездной системы лишь спиральными волнами плотности без привлечения гигантских молекулярных облаков.

В третьей главе используя тригонометрические HST расстояния, фотометрические металличности и изохронные возрасты из женево–копенгагенского обзора, а также однородные спектроскопические опреде-

ления содержаний железа и магния из сводного каталога использованы для построения и исследования диаграмм «возраст – металличность» и «возраст – относительное содержание магния» для звезд тонкого диска. Подробно обсуждено влияние селекционных эффектов. Продемонстрировано, что радиальная миграция звезд не приводит к значимому искажению хода зависимости металличности от возраста. Показано, что первые несколько миллиардов лет формирования тонкого диска межзвездное вещество в нем было в среднем довольно богато тяжелыми элементами ($\langle [Fe/H] \rangle \approx -0.2$) и плохо перемешано, но с возрастом дисперсия металличности непрерывно уменьшалась от $\sigma_{[Fe/H]} \approx 0.22$ до ≈ 0.13 . Все это время среднее относительное содержание магния было несколько выше солнечного ($\langle [Mg/Fe] \rangle \approx 0.1$). Примерно 4 – 5 млрд. лет назад средняя металличность стала систематически увеличиваться, сохраняя неизменной дисперсию, а вслед за этим среднее относительное содержание магния начало уменьшаться. Одновременно, численность звезд в подсистеме резко увеличилась. Перечисленные свойства можно объяснить тем, что низкая на начальных этапах формирования тонкого галактического диска скорость звездообразования внезапно увеличилась около 4–5 млрд. лет назад.

В четвертой главе на основе созданного сводного каталога, содержащего для 221 классической цефеиды положения, скорости, возрасты и содержания 9 химических элементов, исследованы зависимости относительных содержаний α -элементов, а также элементов быстрого и медленного нейтронных захватов от металличности, компонент пространственной скорости и галактоцентрического расстояния. Найдено, что относительные содержания всех элементов в цефеидах от скорости не зависят, но увеличиваются с увеличением галактоцентрического расстояния и уменьшаются с увеличением металличности как и у карликов и гигантов тонкого диска. Однако у цефеид зависимость « $[\alpha/Fe] - [Fe/H]$ » лежит ниже, а зависимости « $[r/Fe] - [Fe/H]$ » и « $[s/Fe] - [Fe/H]$ » — выше, чем аналогичные последовательности у карликов и гигантов. Выдвинуто предположение, что после достижения в межзвездной среде тонкого диска примерно солнечной металличности самые массивные звезды перестали вспыхивать как сверхновые второго типа, которые в основном и обогащали межзвездную среду α -элементами. В итоге в следующих поколениях звезд образовался дефицит относительных содержаний α -элементов, а также небольшой избыток элементов r -процесса, которые выбрасываются в межзвездную среду менее массивными ($8-10 M_{\odot}$) сверх-

новыми второго типа. Избыток в цефеидах элементов s -процесса можно объяснить тем, что часть s -элементов производилась в слабом компоненте s -процесса в атмосферах массивных звезд, которые, возможно, и без взрыва могут сбрасывать верхние части своих оболочек подобно АВГ-звездам. Поскольку же такие массивные звезды, взрываясь как SNe II, обогащали межзвездную среду также и значительным количеством атомов железа, то при их отсутствии отношения $[s/Fe]$ (как и $[r/Fe]$) у следующих поколений звезд должны получиться выше.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Коваль В.В., Марсаков В.А. Боркова Т.В. Связь параметров эллипсоидов скоростей звезд галактического диска с возрастом и металличностью // Астрон. Журн., 2009, Т. 86. № 9. С. 844–860.
2. Коваль В.В., Марсаков В.А. Боркова Т.В. Эволюция эллипсоидов скоростей в тонком диске галактики и радиальная миграция звезд // Астрон. Журн., 2009, Т. 86. № 12. С. 1195–1205.
3. Марсаков В.А. Коваль В.В., Боркова Т.В., Шаповалов М.В., Зависимость «возраст–металличность» в тонком диске Галактики // Астрон. Журн., 2011, Т. 88. № 8. С. 726–742.
4. Марсаков В.А. Коваль В.В., Ковтюх В.В., Мишенина Т.В., Свойства населения классических цефеид в Галактике // Письма в Астрон. Журн., 2013, Т. 39. № 12. С. 942–958.
5. Koval' V.V., Borkova T.V., Marsakov V.A. Evolutionary Changes of the Kinematics of the Galactic Thin Disk Stars in the Solar Neighborhood // Odessa Astronomical Publication, 2008, v.21, P.45–47
6. Marsakov V.A., Koval' V.V., Gozha M.L., Kovtyukh V.V., Mishenina T.V. Open clusters and field cepheids in the galactic disk – contradictions in properties // Odessa Astronomical Publication, 2013, v. 26/1, P. 74–77

Глава 1

Связь параметров эллипсоидов скоростей звезд галактического диска с возрастом и металличностью

1.1 Введение

Наблюдаемая морфологическая структура тонкого диска нашей Галактики, как и любой другой ее подсистемы, обязана исключительно формам орбит входящих в нее звезд. Поэтому «внешний» вид Галактики можно воссоздать по полным пространственным скоростям звезд, расположенным даже в ближайших окрестностях Солнца (в предположении, конечно, что это положение не является как-либо выделенным). Одновременно можно попытаться проследить и динамическую эволюцию дисковой подсистемы по звездам разных возрастов. Классическим методом извлечения такой информации является исследование зависимостей параметров эллипсоидов скоростей Шварцшильда близких к Солнцу звезд от возраста. В первую очередь важно выяснить по какому закону изменяются с возрастом дисперсии компонент скоростей звезд. Возрастное увеличение всех полуосей эллипсоидов хорошо описывается степенным законом вида $\sigma_i \sim t^\gamma$, где σ_i – дисперсия соответствующей компоненты скорости, а t – возраст звезд. Обычно полагают, что такой характер зависимости возникает в результате релаксационных процессов в Галактике (см., например, Fuchs et al.(2001); Holmberg et al. (2007)). (Объяснение, что скорости звезд с момента рождения не претерпевают существенного искажения и поэтому зависимость дисперсии скоростей звезд от возраста отражает изменение динамического состояния межзвездной среды со временем считается менее вероятным.) По величине показателя степени можно су-

дить о характере неоднородностей гравитационного потенциала Галактики, приводящих к непрерывному увеличению дисперсии скоростей родившихся одновременно звезд, т. е. к их «разогреванию». В частности, численным моделированием нагревания стохастическими спиральными волнами плотности удается объяснить наблюдательную форму зависимости «возраст – дисперсия скоростей» в широком диапазоне показателя степени ($0.2 < \gamma < 0.7$). При этом численные расчеты позволяют сделать ограничения, в том числе и на параметры спиральной структуры Галактики (Simone et al. (2004)). Другим возмущителем скоростей может быть бар, расположенный в центре Галактики Chakrabarty (2008). Однако спиральные волны и бар «работают» только в тонком слое галактического диска, тогда как увеличение вертикальной составляющей скорости объяснить они не в состоянии. Для этого привлекают молекулярные облака, которые могут объяснить показатель степени по оси Z вплоть до $\gamma \approx 0.26$ (Hanninen, Flynn (2002)), а для более высоких значений показателя степени — скопления темной материи от распадающихся галактик-спутников под действием приливных сил нашей Галактики (Benson et al. (2013)).

Новая эра в исследованиях кинематики звезд наступила после опубликования данных наблюдений HIPPARCOS. Благодаря новым прецизионным измерениям лучевых скоростей и собственных движений стало ясно, что распределение звезд поля по скоростям не является однородным и среди них выделяется большое число групп звезд с одинаковыми угловыми моментами. Эти, так называемые, движущиеся группы или звездные потоки можно условно разделить на две группы по происхождению. Происхождение потоков первой группы связывают с нерегулярностями галактического потенциала. В частности, происхождение потоков Плеяд, Гиад и Сириуса объясняют прогревом диска стохастическими спиральными волнами, теоретическая возможность которого показана в работе Simone et al. (2004). Другим возмущителем эллипсоида скоростей звезд, как полагают, является бар в центре Галактики, о существовании которого в нашей Галактике свидетельствует анализ наблюдений звезд в ИК диапазоне (Babysiaux, Gilmore (2005)). По-видимому, именно бар, генерируя спиральные волны плотности (Fux (2001)), привел к образованию во внешнем Линдбладовском резонансе потока (ветви) ξ Геркулеса (Dehnen, Binney(1999); Dehnen (2000)), которая в фазовом пространстве скоростей находится как раз на границе между подсистемами толстого и тонкого дисков Галактики. Другая группа потоков связывается с остатками разрушенных довольно массивных ($4 \cdot 10^8 M_{\odot}$) галактик-спутников

(Helmi et al. (2006)). Разработано несколько методик выделения звезд движущихся групп и все они выделяют практически одни и те же потоки и звезды в них. Согласно многочисленным исследованиям в окрестностях Солнца примерно треть звезд можно идентифицировать членами тех или иных движущихся групп (см., например, Helmi et al. (2006); Famaey et al. (2005)). При этом звезды потоков, образованные неравномерностью гравитационного потенциала, т.е. спиральными волнами и баром, составляют большинство. Все эти потоки искажают поле скоростей звезд поля разного возраста и затрудняют извлечение информации, необходимой для восстановления динамической эволюции Галактики. После исключения звезд потоков распределения оставшихся звезд на диаграммах « $U - V$ » и « $V - \lg t$ » действительно становятся более гладкими (Assian et al. (2013)).

Характер зависимостей между возрастом и дисперсиями скоростей по близким звездам поля исследовался во многих работах уже и на базе современных астрометрических и спектроскопических измерений. При этом показатели степени по разным выборкам звезд оказывались в пределах от $\gamma \approx 0.34$ (Binney et al.(2000)), до $\gamma \approx 0.50$ (Fuchs et al.(2001); Holmberg et al. (2007)). Из последних попыток воспроизвести зависимости «возраст – дисперсии скоростей» отметим работу Нордстрем и др. (2004), в которой показано, что «разогревание» всех компонент скоростей звезд в галактическом диске (при среднем значении $\langle \gamma \rangle \approx 0.35$) происходило в течение всей жизни подсистемы. Вывод о непрерывности действия релаксационных процессов подтвердила следующая работа того же коллектива авторов Holmberg et al. (2007) с ревизованными величинами возрастов и металличностей звезд (но показатели степени у них несколько увеличились — $\langle \gamma \rangle \approx 0.40$). Используя данные того же каталога (Nordstrom et al.(2004), Seabroke, Gilmore (2007)) исследовали зависимость только вертикальной компоненты скорости от возраста и утверждают, что для описания зависимости степенной закон не требуется, поскольку, согласно их анализу, после ~ 4.5 миллиардов лет у величины σ_W наступает насыщение.

К сожалению, во всех этих работах зависимости строились по всем близким звездам поля, среди которых присутствует заметное количество звезд толстого диска. Кроме того, для получения корректных результатов из выборки звезд тонкого диска необходимо удалить звезды движущихся групп. Более полную информацию о кинематике звезд дает исследование зависимостей от возраста всех параметров эллипсоидов скоро-

стей, а не только дисперсий компонент скоростей, как это было сделано во всех перечисленных работах. В связи с много обсуждающимся в последнее время существованием очень старых и одновременно металлических звезд желательно также проследить изменение параметров эллипсоидов скоростей для звезд тонкого диска разной металличности.

1.2 Наблюдательные данные

В качестве основного источника данных в первой главе использовался женево-копенгагенский каталог, содержащий возрасты, металличности и кинематику для ≈ 14000 F–G-карликов ярче $V \approx 8.5^m$ (см. Holmberg et al. (2007)). Металличности в каталоге определены по индексам $uvby$, β -фотометрии, исправленным за межзвездное покраснение. Расстояния примерно для 75 % звезд в каталоге определены из тригонометрических параллаксов каталога HIPPARCOS, причем авторы использовали только параллаксы с ошибками менее 13 %. Для звезд с отсутствующими параллаксами или с их большими ошибками использованы фотометрические расстояния. Заявленная для них точность также составляет 13 %. Фотометрические расстояния в каталоге использованы, в основном, для далеких звезд, тогда как для абсолютного большинства звезд в пределах 60 пк приняты тригонометрические расстояния. Лучевые скорости получены авторами в разное время в рамках проекта «CORAVEL», а собственные движения взяты ими из каталога «TYCHO». В итоге заявляемая ими точность определения компонент скоростей звезд равна $\pm 1.5 \text{ км с}^{-1}$.

В данном каталоге, авторы, используя Падуанские теоретические изохроны (Girardi et al. (2000), Salasnich et al. (2000)), вычислили наиболее вероятные возрасты звезд по методике из работы Джоргенсен и Линдгрен (2005), учитывающей ошибки определения их эффективных температур, абсолютных звездных величин и металличностей. При этом автоматически учитывалась переменность «скорости» перемещения звезд вдоль эволюционных треков. Holmberg et al. (2007) нашли в целом хорошее согласие между своими определениями возрастов и, в частности, из работы Takeda (2007), где они определялись по той же методике, но на основе современных Йельских изохрон. Отмеченное свойство методики негативным образом сказалось на звездах, находящихся в окрестностях точек поворота, где изохроны имеют сложную форму, поскольку на этом участке звезды эволюционируют сравнительно быстро и вероятность об-

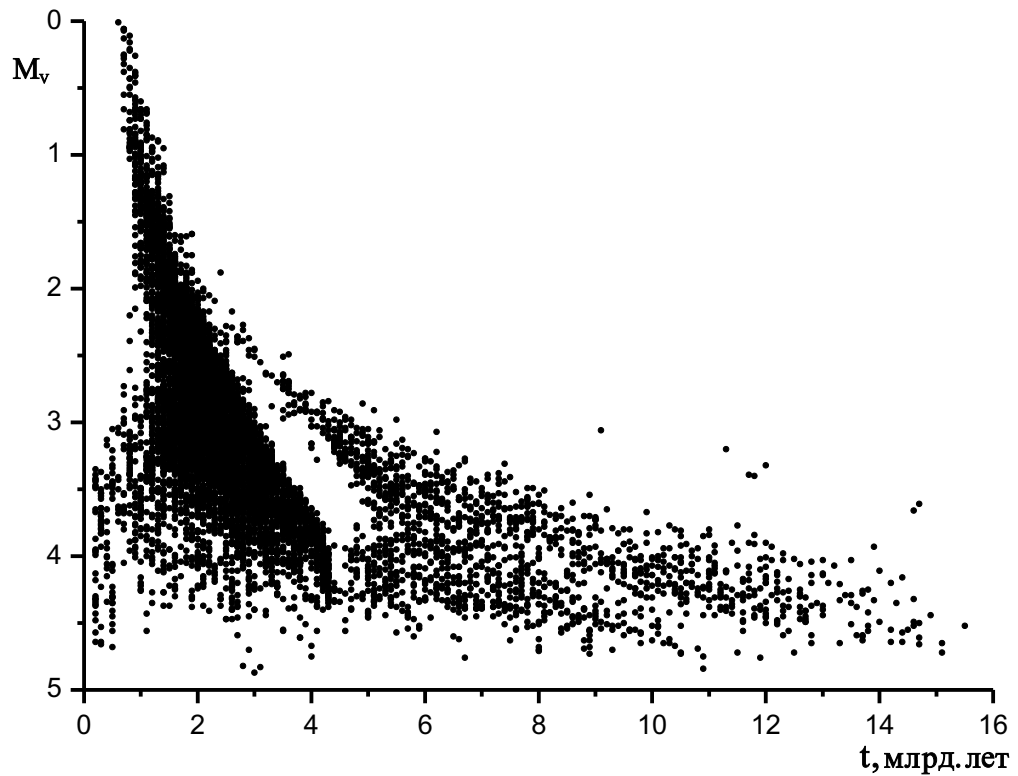


Рис. 1.1: Диаграмма «возраст – абсолютная звездная величина» для одиночных звезд каталога Holmberg et al. (2007) с ошибками определения возраста $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет.

наружения звезды на этой стадии крайне низка. Наша проверка показала, что неопределенности в «назначении» возрастов для звезд точек поворота как правило равны или меньше одного миллиарда лет. Однако, поскольку этот эффект оказался наиболее существенным для сравнительно молодых звезд, из выборки полностью «пропали» металлические звезды, как находящиеся вблизи эволюционной стадии, соответствующей выгоранию последнего процента водорода в ядре и началу коллапса последнего (им всем был приписан более молодой возраст). Эту особенность метода хорошо иллюстрирует диаграмма «возраст – абсолютная звездная величина» для одиночных звезд каталога с ошибками определения возраста $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет, приведенная на рисунке 1.1 — налицо полное отсутствие звезд в самой середине диаграммы. Поэтому, из-за возможного неправомерного включения звезд в более молодую возрастную группу следует с осторожностью относиться к некоторым деталям на зависимостях «возраст – дисперсии скоростей», особенно в диапазоне 3 – 5 млрд. лет. ненадежно определяются также возрасты для звезд с абсолютными величинами $M_V > 4.3^m$ — они попадают на диаграмме Герцшпрунга–Рессела в область, где изохроны проходят столь густо, что ошибки определения возраста становятся очень велики. К счастью, ограничение используемой

выборки звезд по ошибкам этого параметра позволяет работать с наиболее надежными возрастами. Анализ показал, что в исходном каталоге средняя ошибка $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет достигается более чем для 90 % звезд, а ошибка $\varepsilon_t < \pm 2$ млрд. лет — для 85 % звезд. Учитывая вышеизложенное, мы посчитали возможным использовать металличности и возрасты каталога Holmberg et al. (2007) для настоящих статистических исследований, не упуская из внимания диапазон проблемных возрастов.

При разработке критерия стратификации звезд по подсистемам Галактики для учета их химического состава мы использовали данные сводного каталога однородных спектроскопических определений содержаний железа и магния (Боркова, Марсаков (2005)). В каталоге собраны практически все опубликованные до января 2004 года определения содержаний магния (представителя α -элементов) и железа в карликах и субгигантах околосолнечной окрестности, определенные методом синтетического моделирования высокодисперсионных спектров.

1.3 Составление репрезентативной выборки звезд тонкого диска

Параметры эллипсоидов скоростей по определению имеют смысл только для близких звезд поля. Для звезд, находящихся вблизи галактической плоскости, принцип составления выборки звезд тонкого диска может заметно повлиять на характер получаемых зависимостей величин полуосей и других параметров эллипсоидов скоростей от возраста. Логичнее всего составлять выборку, руководствуясь кинематическими критериями, поскольку именно скорости звезд определяют общую структуру подсистемы. Однако в этом случае параметры эллипсоидов скоростей самых старых (и, следовательно, самых высокоскоростных) групп звезд оказываются зависимыми от величины в какой-то мере субъективно принятого разделительного критерия между подсистемами тонкого и толстого дисков. В итоге показатели степени γ в искомым зависимостях дисперсий скоростей от возраста $\sigma_i = t^\gamma$ для тонкого диска могут быть искажены. Альтернативой кинематическому является химический критерий выделения звезд тонкого диска. Действительно, согласно многочисленным исследованиям, между относительными содержаниями α -элементов в звездах тонкого и толстого дисков существует скачкообразное различие. При этом абсолютное большинство звезд тонкого диска имеют низкие значения отношений $[\alpha/Fe] < 0.25$ (см., например,

Fuhrmann (2000)). Этот критерий позволяет сделать выборку звезд тонкого диска, в которой будет примесь не более 10% звезд с кинематикой толстого диска и примерно такой же процент звезд в нее не попадет с большими относительными содержаниями магния, но с кинематикой тонкого диска (Марсаков, Боркова (2006)). Принадлежность этого небольшого числа звезд к той или иной подсистеме считается неопределенной (Fuhrmann (2000)).

К сожалению, детальный химический состав звездных атмосфер можно определить только по спектрам наиболее ярких объектов, и найден он для ограниченного количества звезд. С другой стороны, полное содержание тяжелых элементов (или металличность) можно находить из данных фотометрии и для более слабых звезд, поэтому она известна для большинства близких звезд, что позволяет получать по ним статистически значимые результаты. Металличность также можно использовать в качестве независимого критерия выделения F–G- звезд тонкого диска. Дело в том, что как впервые показано в работе Марсаков, Сучков (1977), распределение звезд поля по металличности обнаруживает провал в окрестности $[Fe/H] \approx -0.5$, естественным образом отделяя звезды тонкого диска от менее металличных звезд более старых подсистем Галактики. При использовании такого критерия в выборку звезд тонкого диска, так же, как и в случае использования в качестве критерия относительных содержаний α -элементов, не попадает чуть более десяти процентов звезд с кинематикой тонкого диска. Одновременно примерно такая же доля звезд с высокой металличностью демонстрирует кинематику толстого диска (см. Марсаков, Боркова (2006)).

Можно идентифицировать звезды тонкого диска и по возрасту, поскольку эта подсистема молодая и массовое звездообразование в ней началось только ≈ 9 млрд. лет назад, тогда как в толстом диске звездообразование закончилось в основном ≈ 12 млрд. лет назад (Fuhrmann (2000)). Однако из-за больших ошибок определения возрастов одиночных звезд, в данной работе они используются только в статическом смысле, т. е. исключительно для разделения звезд на группы разного возраста.

Перечисленные выше однопараметрические критерии включают в подсистему тонкого диска в основном одни и те же звезды, и различаются полученные по ним выборки только звездами, пограничными между двумя дисковыми подсистемами. В работе Марсаков, Боркова (2005) был разработан кинематический критерий выделения звезд тонкого диска, который неявно учитывает химический состав звезд. Критерий разра-

батывался на основе сводного каталога спектроскопических определений содержаний железа и магния в 867 близких звездах с точными параллаксами (Марсаков, Боркова (2005)). Тонкий диск мы выделили сразу двумя кинематическими условиями, поскольку одного из них оказалось недостаточно. Для близких звезд удобен критерий: $V_{ост} = (U^2 + V^2 + W^2)^{1/2} < 85 \text{ км с}^{-1}$, где U , V , W и $V_{ост}$ — компоненты пространственной скорости и остаточная скорость звезды относительно локального центроида соответственно. Другой критерий не зависит от местоположения звезды на галактической орбите и основан на выражении, предложенном в работе Chiappini et al. (1997): $(Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2} < 1.05$, где Z_{max} — величина максимального удаления точек орбиты от галактической плоскости, выраженная в килопарсеках, а e — эксцентриситет орбиты звезды. Более высокоскоростные звезды включались нами в толстый диск. Величины обоих критериев подбирались таким образом, чтобы минимизировать количество звезд с высокими относительными содержаниями магния в тонком диске и с низкими содержаниями — в толстом диске. К сожалению, этот критерий оказался чрезмерно жестким и некоторое количество звезд с химическим составом, приемлемым более для тонкого диска, относит к толстому диску.

Методологически более обоснованным выглядит кинематический критерий, предложенный в работе Bensby et al. (2003). В нем отбор звезд в тонкий и толстый диски осуществляется в предположении, что в обеих подсистемах распределения компонентов скоростей звезд относительно локального центроида подчиняются закону Гаусса:

$$f(U, V, W) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_u \sigma_v \sigma_w} \cdot \exp\left(\frac{U_{LSR}^2}{2\sigma_U^2} - \frac{(V_{LSR} - V_{вр})^2}{2\sigma_V^2} - \frac{W_{LSR}^2}{2\sigma_W^2}\right).$$

Здесь для каждой звезды вычисляется отношение вероятностей принадлежности тонкому (Д) и толстому (ТД) дискам по формуле:

$$Д/ТД = \frac{X_{Д}}{X_{ТД}} \cdot \frac{f_{Д}}{f_{ТД}}.$$

Далее в каждую подсистему отбираются звезды с вероятностью принадлежности ей в 10 раз большей, чем в соседнюю. Для определения вероятностей используются уже известные из других работ дисперсии каждой из трех компонент пространственной скорости σ_U , σ_V , σ_W , средние скорости вращения ($V_{вр}$) и относительные численности звезд ($X_{Д}$, $X_{ТД}$) в обеих подсистемах на солнечном галактоцентрическом расстоянии. Основными недостатками критерия являются, во-первых, постулирование в

нем полученных по старым данным кинематических параметров подсистем, во-вторых, он никак не согласован с химическим составом звезд и, в-третьих, при его использовании оказываются не идентифицированными пограничные между двумя дисковыми подсистемами звезды. В итоге он оказывается еще более жестким, чем описанный выше критерий. Если же отказаться от принятого в работе Bensby et al. (2003) ограничения и включать в подсистему звезды просто с большей вероятностью принадлежности тонкому диску, чем толстому, то в нее попадут звезды, у которых полные остаточные скорости достигают $\sim 120 \text{ км с}^{-1}$, то есть с кинематикой, типичной, скорее, для толстого диска.

С целью оптимизации методологически обоснованного кинематического критерия, чтобы он так же, как и описанный выше критерий, был наилучшим образом согласован с содержаниями химических элементов в звездах, мы решили уточнить по данным используемого нами каталога входные параметры подсистем. Для этого из исходного каталога, предварительно исключив из него двойные звезды, мы по методике Bensby et al. (2003) сделали выборки звезд тонкого и толстого дисков и вычислили для каждой подсистемы дисперсии компонентов скоростей, средние скорости вращения подсистем и уточнили относительные численности звезд обеих подсистем в окрестностях Солнца. В итоге мы получили для тонкого диска следующие значения: $\sigma_U = 31 \text{ км с}^{-1}$, $\sigma_V = 18 \text{ км с}^{-1}$, $\sigma_W = 14 \text{ км с}^{-1}$ и скорости асимметрического смещения относительно Солнца в направлении вращения $V_{Br} = -16 \text{ км с}^{-1}$. Для толстого диска эти же величины оказались равными 68 км с^{-1} , 48 км с^{-1} , 49 км с^{-1} и -53 км с^{-1} , при этом относительные численности звезд подсистем остались прежними, т.е. 94 и 6 процентов соответственно. Наибольшей коррекции подверглись значения σ_V , σ_W и (V_{Br}) для подсистемы толстого диска, которые по сравнению с исходными увеличились по абсолютной величине на 15 – 20%. Надо сказать, что примерно такие же величины получены и в работе (Gilmore et al. (1987); см. также Марсаков, Боркова (2005)). Именно с этими уточненными параметрами подсистем мы из исходного каталога и отобрали для исследования звезды тонкого диска.

Повторной итерации не потребовалось, поскольку при этом полученные величины уже практически не изменялись. На диаграмме « $V_{Ost} - (Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2}$ » рисунка 1.2а разными значками нанесены звезды, отобранные из каталога Holmberg et al. (2007) в тонкий диск по двум критериям. Как видим, при использовании уточненных параметров подси-

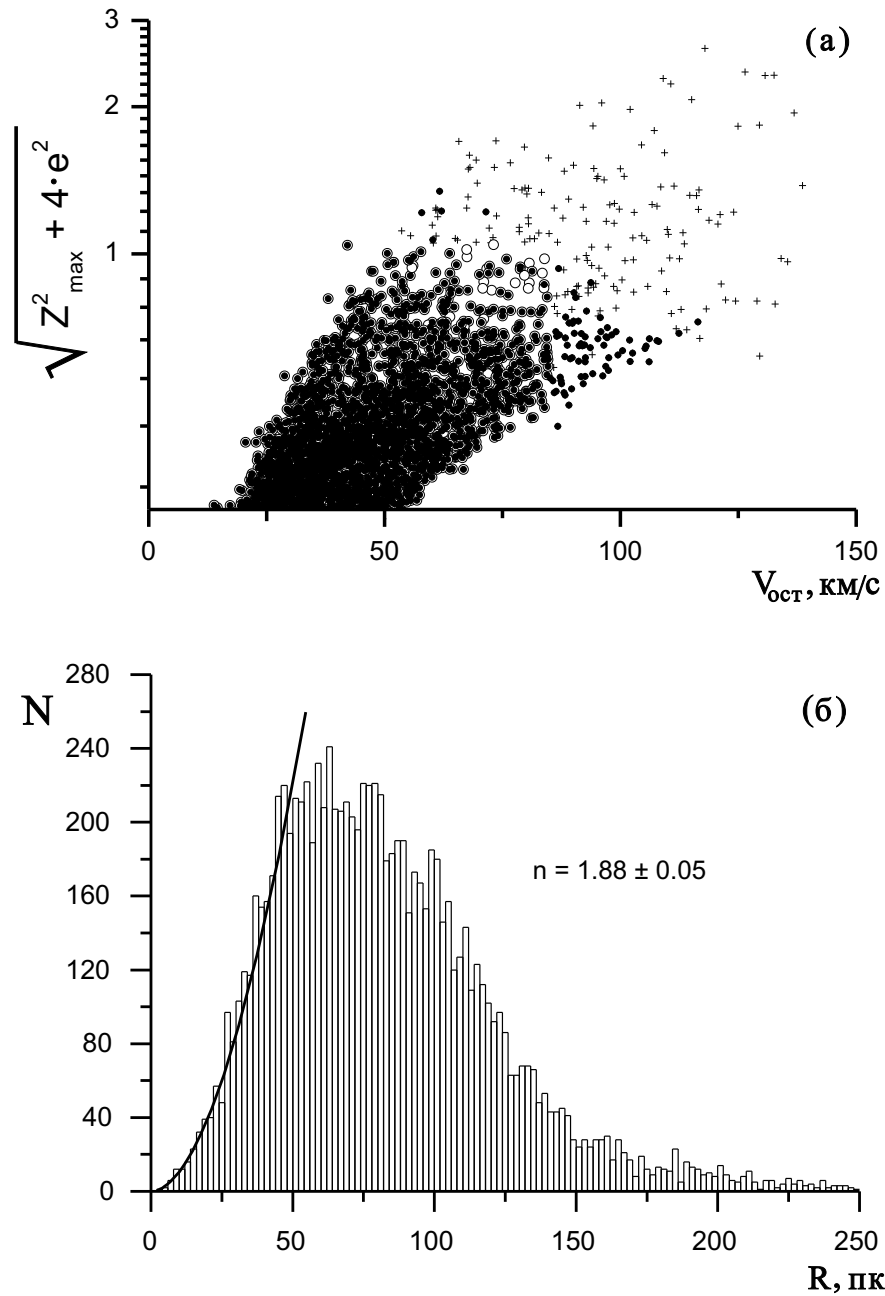


Рис. 1.2: Связь между величинами $\sqrt{Z_{max}^2 + 4 \cdot e^2}$ и остаточными скоростями относительно локального центроида для звезд с ошибками определения возраста $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет (а) и распределение всех одиночных звезд из каталога Марсаков, Боркова (2005) по расстояниям от Солнца (б). Большие открытые кружки – звезды тонкого диска, отобранные по критерию работы Марсаков, Боркова (2005); малые заполненные кружки – звезды, отобранные по новому критерию; крестики – все остальные звезды каталога; кривая – аппроксимация распределения в пределах 60 пк от Солнца степенным законом.

стем, получившийся критерий стал близок к разработанному в работе Марсаков, Боркова (2005). При этом даже не пришлось прибегать к ужесточающему условию включения в подсистему звезд с десятикрат-

но большей вероятностью принадлежности к ней — просто отбирались звезды с вероятностью принадлежности тонкому диску больше, чем толстому. Поэтому в дальнейшем мы получили возможность исследовать характер перехода между подсистемами, получая неискаженные результаты по выборкам, лишенным кинематической селекции. Видим, что в тонкий диск теперь оказались включенными еще некоторое количество звезд, которые ранее мы причисляли к толстому диску. В каталоге Марсаков, Боркова (2005) со спектроскопическими определениями железа и магния нашлось 39 таких звезд. Проверка показала, что включенные звезды в большинстве обнаруживают низкие отношения $[Mg/Fe] < 0.25$ и высокие значения $[Fe/H] > -0.5$, каковые и должны наблюдаться у звезд тонкого диска. В итоге получившийся кинематический критерий стал лучше соответствовать химическому. Кроме того, получившееся разделение звезд дисковых подсистем выглядит на диаграмме более гармоничным, поэтому именно его мы и сделали основным.

Для проведения настоящих исследований, из исходного каталога вначале были удалены отмеченные в нем двойные звезды, далеко проэволюционировавшие звезды ($\delta M_V > 3^m$) и звезды с неуверенно определенными возрастaми ($\varepsilon_t > \pm 3$ млрд. лет). Кроме того, чтобы избавиться от пограничных эффектов, ограничили диапазон эффективных температур (5200 – 7000) К. После применения описанного выше критерия в выборке осталось 5965 предположительно одиночных F–G-звезд тонкого диска с надежными возрастaми. (Итоговая средняя ошибка определения возрастa для звезд получившейся выборки составила $\langle t \rangle = 1.0$ млрд. лет.)

Поскольку целью является исследование свойств параметров эллипсоидов скоростей звезд тонкого диска поля, а не движущихся групп, мы посчитали возможным ограничиться лишь исключением звезд наиболее многочисленных и хорошо известных звездных потоков без применения громоздкого математического аппарата. Руководствуясь средними величинами компонентов скоростей групп, выделенных в нескольких работах методами вейвлет-анализа и адаптивного сглаживания (см., в частности, Бобылев, Байкова (2007); Antoja et al. (2008)), и распределением звезд нашей выборки тонкого диска в фазовом пространстве компонентов скоростей, мы определили примерные границы, где плотности звезд заметно превышают среднюю по полю. В таблице 1.1 приведены названия звездных потоков, диапазоны компонентов скоростей относительно Солнца, по которым мы отделяли звезды потоков, и количество звезд, исключенных из выборки. Компоненты U , V и W направлены в сторону

Таблица 1.1: Компоненты скоростей движущихся групп звезд относительно Солнца

Название группы	N	Диапазоны скоростей звезд потоков		
		U км с ⁻¹	V км с ⁻¹	W км с ⁻¹
Сириус	367	-12 ÷ 17	0 ÷ 12	-18 ÷ 6
Гиады	555	-43 ÷ -24	-23 ÷ -10	-17 ÷ -10
Плеяды	183	-17 ÷ -5	-31 ÷ -21	-16 ÷ 4
	88	-24 ÷ -10	-9 ÷ -2	-18 ÷ 6
Волосы Вероники	176	-20 ÷ -6	-10 ÷ -2	-18 ÷ 3
ξ Геркулеса	39	-34 ÷ 27	-52 ÷ -44	18 ÷ 4

центра, вращения и северного полюса Галактики соответственно. Группу Плеяд оказалось удобнее выделить двумя диапазонами скоростей. В итоге из выборки удалено около 25 % звезд и ее объем стал равен 4557 звездам. Построенные UV -, UW -, VW -распределения звезд оставшейся выборки действительно продемонстрировали более гладкие структуры. Неудаленные из выборки звезды остальных известных потоков настолько малочисленны в окрестностях Солнца, что вряд ли способны значимо повлиять на параметры эллипсоидов скоростей звезд поля тонкого диска.

В связи с отбором звезд в исходный женевско-копенгагенский каталог исключительно по звездной величине, возникла необходимость оценки влияния эффектов селекции, обусловленных различием глубины обзора для звезд разной металличности и температуры. Действительно, на больших расстояниях будут превалировать высокосветимостные горячие, то есть более молодые (а значит и более медленные) звезды главной последовательности, искажая параметры эллипсоидов скоростей. На рисунке 1.2б приведено распределение одиночных звезд каталога в заданном температурном диапазоне по расстояниям от Солнца. Сплошной кривой нанесена аппроксимация методом наименьших квадратов левого крыла гистограммы степенным законом вида $N = \alpha R^n$. Оказалось, что при аппроксимации распределения до 60 пк показатель степени в пределах 3σ равен двум $n = 1.88 \pm 0.05$, какой и должен наблюдаться в случае равномерного распределения звезд в исследуемом объеме. Поэтому, для сравнения мы дополнительно составили выборку, ограниченную расстоянием от Солнца равным 60 пк, в пределах которого, как видим, ее можно считать практически полной. В такой выборке осталось всего 1160 звезд тонкого диска (звезды потоков исключены), чего явно недостаточно для проведения исследований в полном объеме, поэтому ее будем использовать только для сравнения.

1.4 Сравнение параметров эллипсоидов скоростей, вычисленных по разным выборкам звезд тонкого диска

Вычисление параметров эллипсоидов скоростей и скорости Солнца относительно локальных центроидов проводилось по формулам из монографии Огородников (1958), а их ошибок — по формулам из работы Паренаго (1951). Все выборки мы разбили на двадцать одну, равную по численности подгруппу по возрастам с тем, чтобы отследить характер изменения параметров эллипсоидов от возраста и выяснить, будет ли он отличаться у разных выборок. В первом ряду рисунка 1.3 приведены зависимости величин полуосей $\sigma_i(t)$ от возраста для корректно отобранных звезд тонкого диска, для звезд диска без движущихся групп и для звезд последней выборки, лежащих ближе 60 пк. Все зависимости аппроксимированы методом наименьших квадратов степенным законом вида $\sigma_i \sim t^\gamma$. Оценим, насколько отличается поведение величин соответствующих полуосей для звезд, принадлежащих согласно разработанному нами критерию тонкому диску, и для всех близких к Солнцу звезд (точнее для всех одиночных звезд каталога Holmberg et al. (2007) с ошибками возрастов $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет). Оказалось, что увеличение с возрастом величин полуосей эллипсоида у звезд тонкого диска описывается степенным законом надежнее, чем для всех близких звезд — ошибки при коэффициентах регрессии γ у всех зависимостей оказались примерно в два раза меньше (см. для сравнения зависимости от возраста дисперсий компонентов скоростей близких звезд на рисунках 34 и 7 в работах Holmberg et al. (2007) и Holmberg et al. (2009) соответственно). Одновременно величины всех показателей степени γ для одноименных дисперсий уменьшились примерно в полтора раза. И если для всех близких звезд величины показателей степени получились хорошо согласующимися с обычно получаемыми другими авторами и равными в среднем $\langle \gamma \rangle = 0.42$ с неопределенностями ± 0.04 (см. Holmberg et al. (2007) и Holmberg et al. (2009) -0.43 ± 0.04), то для корректно отобранных звезд тонкого диска все показатели получились за пределами 3σ меньше: $\langle \gamma \rangle = 0.28$, а их неопределенности — ± 0.02 (см. рисунок 1.3а). Уменьшение показателей степени произошло в основном за счет уменьшения величин всех полуосей у старых подгрупп, где доля звезд толстого диска велика. Дополнительные исследования показали, что применение более строгих критериев приводит лишь к некоторому занижению у самых старых подгрупп только величины большой полуоси,

тогда как средняя и малая полуоси остаются у них практически неизменными. Показатели степени всех зависимостей при этом в пределах ошибок также не изменяются. (Заметим, что если выборку не ограничивать звездами с ошибками возрастов $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет, то все показатели степени возрастают в среднем примерно на $\Delta\gamma \approx 0.03$)

На рисунке 1.3б приведены диаграммы «возраст – величины полуосей» для звезд поля тонкого диска без движущихся групп. Численность звезд в подгруппах против 284 в предыдущей выборке стала равной 217 звездам, что привело к некоторому увеличению ошибок определения величин полуосей (см. бары на диаграммах), но не увеличило разброса точек, поэтому ошибки определения величин показателей степени остались неизменными. Из рисунка видно, что исключение звездных потоков увеличило за пределами ошибок величины полуосей у наиболее молодых звездных подгрупп и оставило их практически неизменными у старых подгрупп. В итоге показатели степени всех зависимостей несколько уменьшились, правда, в пределах ошибок.

Наконец на рисунке 1.3в, такие же зависимости построены для выборки звезд тонкого диска без движущихся групп, расположенных ближе 60 пк от Солнца. Численности звезд в подгруппах здесь существенно уменьшились и стали равными всего 55 звездам, что привело к резкому увеличению ошибок определения величин полуосей и показателей степени (см. размеры баров и величины ошибок коэффициентов регрессии γ на панелях). Систематических сдвигов по сравнению с предыдущей панелью не видно — величины полуосей и показатели степени соответствующих зависимостей не претерпели систематических изменений.

Таким образом, применение корректного критерия отбора звезд в подсистему тонкого диска существенно уменьшило дисперсии скоростей у старых групп звезд и практически не изменило их у молодых групп. Это привело к существенному уменьшению показателей степени аппроксимационных зависимостей «возраст – величины полуосей эллипсоидов» по сравнению с аналогичными зависимостями для всех близких к Солнцу звезд. Исключение из выборки звезд движущихся групп также немного уменьшило показатели степени, но уже за счет увеличения размеров полуосей у молодых подгрупп. Ограничение же ее только ближайшими звездами, где выборка звезд тонкого диска в данном температурном диапазоне полна, не повлияло на результат.

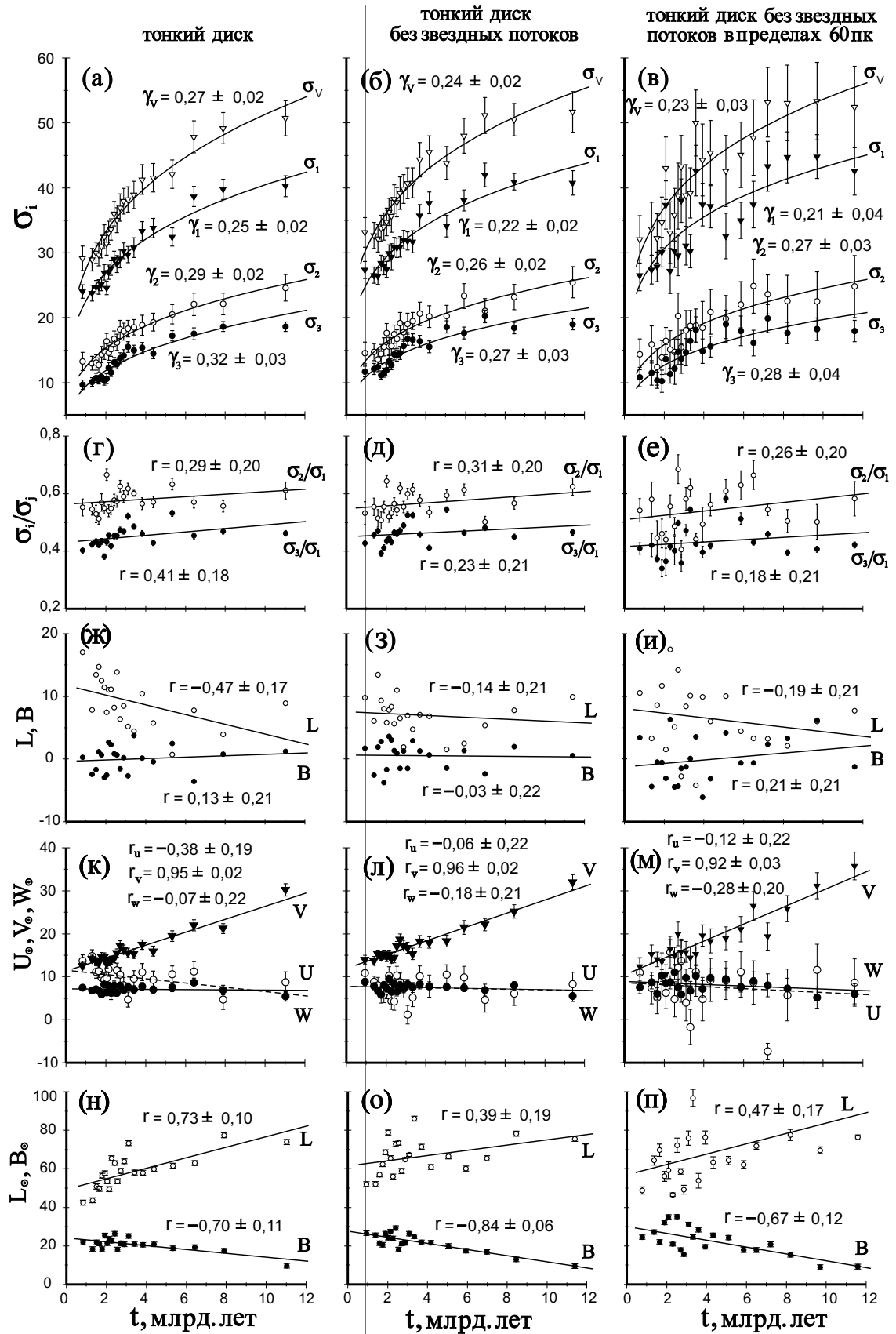


Рис. 1.3: Зависимости параметров эллипсоидов скоростей от возраста для всех одиночных F–G-звезд тонкого диска с ошибками определения возраста $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет, отобранных по нашему критерию (первый столбец); то же, но с исключенными звездами движущихся групп (второй столбец); то же, но в пределах 60 пк от Солнца (третий столбец). Зависимости от возраста величин полуосей эллипсоидов скоростей и полной остаточной скорости (верхний ряд), отношений полуосей эллипсоидов (второй ряд), координат вертекса (третий ряд), компонент скоростей Солнца относительно соответствующих центроидов (четвертый ряд) и координат апекса солнечного движения (пятый ряд). Верхний ряд: кривые – аппроксимации зависимостей степенным законом, надписи на панелях – величины показателей степени с ошибками, бары – ошибки определения соответствующих величин (для координат вертекса и апекса они менее размеров значков). На остальных панелях: сплошные линии – прямые регрессии, цифры – коэффициенты корреляций

Обратим внимание, что на всех графиках у полуосей наблюдаются изломы зависимостей в окрестности 3 – 5 млрд. лет так, что крутой подъем при малых возрастах сменяется практически пологой зависимостью в течение дальнейших 2 – 3 млрд. лет. Особенно этот эффект заметен у малой и (в меньшей степени) средней полуосей. (Возможной причиной возникновения этого эффекта вполне могут оказаться отмеченные выше издержки определения возрастов звезд.)

Рассмотрим теперь, как зависят от используемой выборки другие параметры эллипсоидов скоростей звезд. Во втором ряду рисунка 1.3 последовательно приведены зависимости от возраста величин отношений полуосей для тех же выборок. Аппроксимации прямыми регрессиями точек на всех панелях обнаружили небольшие положительные тренды величин отношений малой и средней полуосей к большой, правда вероятности случайного возникновения всех корреляций оказались намного больше 5%, что говорит о низкой статистической значимости трендов. Отметим, что на всех панелях отношения средней полуоси к большой при любом возрасте < 0.60 (большие разбросы точек вокруг аппроксимационных кривых и размеры баров ошибок на последней панели в основном объясняется более чем в четыре раза меньшей численностью звезд в подгруппах). Для обоих отношений можно заметить некоторое (статистически незначимое) изменение наклона зависимости от возраста после пересечения $\approx 3 - 5$ млрд. лет.

В третьем ряду рисунка 1.3 приведены зависимости от возраста координат вертекса в галактической системе координат для соответствующих выборок. У всех выборок прямые регрессии демонстрируют слабое уменьшение отклонений долготы вертекса (L) с увеличением возраста

(особенно заметное для выборки с неисключенными движущимися группами), тогда как широта вертекса систематически не зависит от возраста и на всех диаграммах примерно равна нулю. Все корреляции являются незначимыми, однако неизменность знака регрессий для отклонений вертексов по долготе у разных выборок может свидетельствовать о реальном ее наличии и корреляция вполне может обрести значимость на более объемной выборке. Причем, у всех выборок можно обнаружить искажение монотонности хода зависимости галактической долготы направления вертекса от возраста в окрестности 3–5 млрд. лет (см. рисунок 1.3 ж, з, и).

Характеры зависимостей от возраста интегральных параметров эллипсоидов скоростей звезд — компонент скоростей Солнца относительно соответствующих центроидов и галактических координат апекса солнечного движения, приведенные в четвертом и пятом рядах рисунка 1.3, оказались почти одинаковыми для всех обсуждаемых выборок. U - и W -компоненты скорости Солнца оказались практически не зависящими от возраста, тогда как V -компонента значимо увеличивается с возрастом (о чем свидетельствует большое значение коэффициента корреляции). Поскольку солнечное движение является отражением движения соответствующих центроидов, последнее означает, что в среднем угловой момент звезд линейным образом уменьшается с их возрастом. Высокие коэффициенты корреляции прямых регрессий, приведенные в последнем ряду рисунка 1.3, указывают на значимое увеличение долготы и уменьшение широты апекса солнечного движения с увеличением возраста звездной группы.

1.5 Эллипсоиды скоростей звезд разной металличности

Исследуя химический состав звезд тонкого диска, было обнаружено, что с уменьшением металличности среди них появляется все больший процент с аномально увеличенными для данной подсистемы относительными содержаниями магния (Марсаков, Боркова (2006)). Этот факт можно интерпретировать как свидетельство образования таких звезд из вещества, испытавшего иную химическую, а возможно и динамическую эволюцию. И если звезды «помнят» динамическое состояние межзвездной среды, из которой они образовались, то кинематика звезд разной металличности может оказаться различной. В связи с этим интересно посмотреть параметры эллипсоидов скоростей звезд разной металличности. Рассмотрим

вначале, как ведут себя параметры эллипсоидов скоростей звезд смешанного возраста в зависимости от металличности. Поскольку ограничение по расстояниям не привело у нас к искажению параметров эллипсоидов скоростей, в дальнейшем мы будем пользоваться нашей полной выборкой звезд тонкого диска с исключенными звездами движущихся групп. Для построения диаграмм, представленных на рисунке 1.4, выборка была разделена на одиннадцать одинаковых по численности подгрупп разной металличности, содержащих по 414 звезд. Как видно из рисунка, большинство параметров обнаруживают тренды от металличности (см. соответствующие коэффициенты корреляции на панелях). Так, с увеличением металличности величины всех полуосей систематически уменьшаются — вероятности случайного возникновения любой из корреляций $P \ll 1\%$. Хотя и малозначимо ($P \approx 20\%$), но уменьшаются и отношения средней и малой полуосей к большой, а также отклонения широты вертекса, тогда как отклонения вертекса по долготе очень сильно увеличиваются ($P \ll 1\%$).

Систематические изменения от металличности демонстрируют и некоторые интегральные параметры движения эллипсоидов скоростей звезд относительно Солнца. Из рисунка 1.4 видно, что корреляции для азимутальной компоненты скорости, а также обеих координат апекса оказываются высокозначимыми ($P \ll 1\%$). Две другие компоненты солнечного движения от металличности не зависят. При этом V -компонента демонстрирует парадоксальную закономерность (отмеченную впервые в работе Marsakov et al. (1990)), заключающуюся в том, что угловой момент звезд более металличных групп оказывается меньше (а не больше, как можно было ожидать!), чем у менее металличных звезд. Действительно, выше мы видели, что скорость вращения звезд вокруг галактического центра в среднем линейно уменьшается с увеличением их возраста, значит угловой момент (для близких звезд скорость вращения пропорциональна угловому моменту) можно считать статистическим индикатором возраста. С другой стороны, при одинаковой температуре «изохронный» (реальный) возраст более металличных звезд главной последовательности в среднем меньше, чем у менее металличных. В итоге, при одинаковом «изохронном» возрасте более металличные звезды оказываются «кинематически» старше менее металличных. Обратим внимание на одну деталь, проявляющуюся в той или иной степени на зависимостях от металличности всех исследуемых параметров — это их излом в окрестности $[Fe/H] \approx -0.25$.

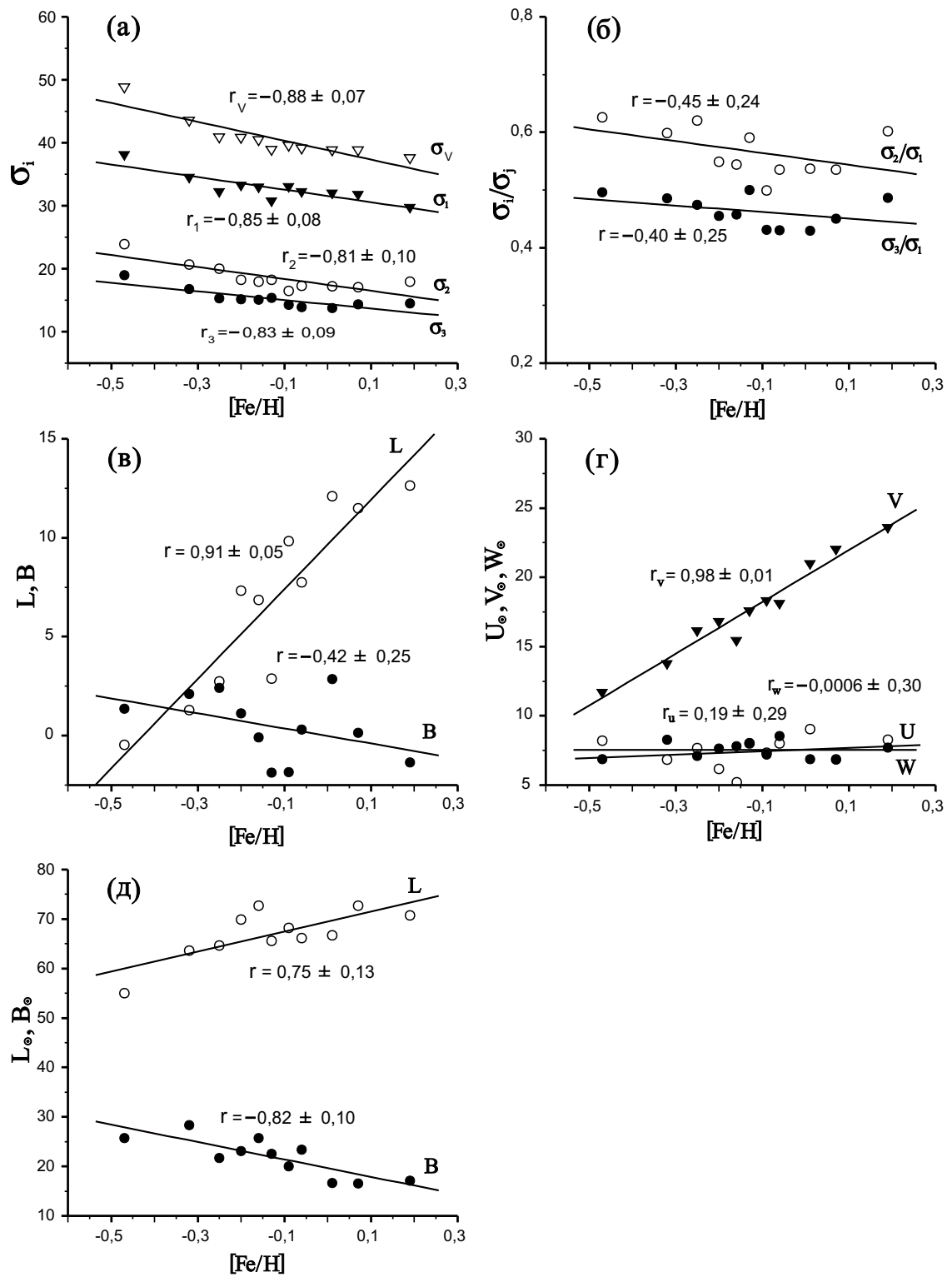


Рис. 1.4: Зависимости от металличности величин полуосей эллипсоидов скоростей и полной остаточной скорости (а), отношений полуосей эллипсоидов (б), координат вертекса (в), компонент скоростей Солнца относительно соответствующих центроидов (г) и координат апекса солнечного движения (д). Сплошные линии – прямые регрессии, цифры – коэффициенты корреляций. На каждой панели нанесены средние бары ошибок определения соответствующих параметров на всех панелях оказались меньше размеров значков.

Наиболее отчетливо изломы можно проследить для отношений σ_2/σ_1 , отклонений вертекса (L) и координат апекса по долготе, где правее этой точки корреляции практически исчезают. Выполаживание правее этой точки можно заметить и на зависимостях всех полуосей эллипсоидов.

Рассмотрим далее зависимости от возраста для звезд в узких диапазонах по металличности. Для этого мы разделили все звезды нашей выборки тонкого диска с исключенными звездами движущихся групп на четыре примерно равные по численности группы граничными значениями $[Fe/H]$, равными -0.25 , -0.13 и 0.00 , а затем каждую еще на 12 подгрупп по возрасту. На графиках первого ряда рисунка 1.5 приведены зависимости от возраста величин полуосей и дисперсии полной остаточной скорости звездных групп разной металличности. Из диаграмм следует, что степенной характер зависимостей в каждой группе по металличности сохранился. При этом для всех полуосей и дисперсии полной остаточной скорости можно проследить систематические изменения величин показателей степени от металличности, несмотря на довольно малую численность звезд в подгруппах (примерно по 95 штук), из-за которой их ошибки получились гораздо больше, чем на рисунке 1.3. Действительно, все одноименные показатели степени демонстрируют наибольшие значения у группы промежуточной металличности ($-0.13 < [Fe/H] < 0.00$) и систематически уменьшаются в обе стороны (исключением является большая величина γ для малой полуоси самой малометалличной группы). У малометалличных звезд уменьшение показателей степени происходит за счет увеличения дисперсий скоростей у молодых подгрупп, а у металлических – за счет их уменьшения у старых. Для более надежного выявления систематических различий показателей степени у звезд разной металличности необходима более объемная выборка звезд тонкого диска. Сравнение диаграмм первого ряда также показывает, что обнаруженное на рисунке 1.4а систематическое увеличение дисперсий скоростей с уменьшением металличности у звезд смешанного возраста, можно проследить и у звезд любого возраста. В итоге, чем меньше металличность группы, тем выше, в среднем, лежат одноименные зависимости. Причем, этот подъем увеличивается с возрастом. Отметим, что намек на обнаруженный по всем звездам тонкого диска излом зависимостей в окрестности 3 – 5 млрд. лет (см. рисунок 1.3) можно отследить во всех группах. На графиках среднего ряда рисунка 1.5 приведены зависимости от возраста отношений полуосей для тех же групп.

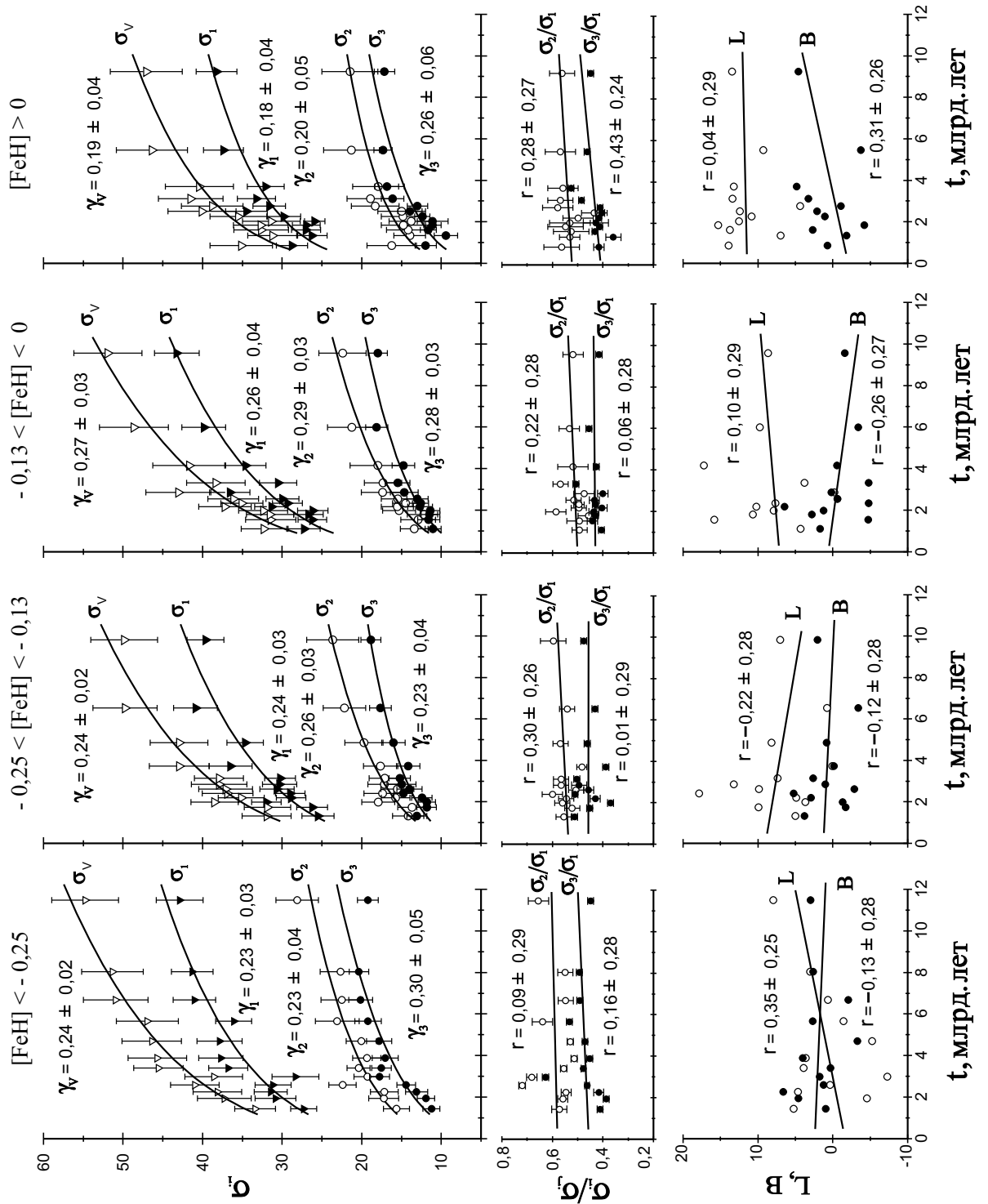


Рис. 1.5: Зависимости параметров эллипсоидов скоростей звезд тонкого диска от возраста для четырех групп по металличности. Сверху указаны диапазоны металличности. Обозначения как на рисунке 1.3.

Их наклоны не обнаруживают систематических изменений от металличности, хотя все корреляции зависимостей «возраст — σ_i/σ_j » положительные, а в некоторых случаях коэффициенты корреляции отличаются от нуля даже за пределами ошибок. Для более надежного определения наклонов этих зависимостей и различий между ними также необходима более объемная выборка звезд тонкого диска.

Зависимости от возраста и металличности направлений вертексов эллипсоидов скоростей приведены в третьем ряду рисунка 1.5. Видим, что на всех графиках отклонения вертексов ни по долготе ни по широте не обнаруживают зависимостей от возраста — все коэффициенты корреляции в пределах ошибок равны нулю. Налицо и полное отсутствие систематичности: при переходе от одной группы по металличности к другой соответствующие корреляции иногда вообще изменяют знак. Одновременно видим, что обнаруженное на рисунке 1.4 в по звездам смешанного возраста систематическое увеличение величины долготы вертекса с увеличением металличности характерно для звезд любого возраста. В итоге, большие полуоси эллипсоидов скоростей звезд любого возраста, направленные практически точно на центр Галактики при малой металличности, с увеличением $[Fe/H]$ начинают все больше отклоняться от этого направления, но только по долготе.

Обратимся теперь к параметрам, которые характеризуют не динамическое состояние звезд внутри группы, а движение групп в целом. На рисунке 1.6 в первом ряду приведены зависимости от возраста и металличности компонент скорости солнечного движения относительно локальных центроидов соответствующих групп звезд. Если взять эти скорости с обратным знаком, то это будет движение локальных центроидов относительно Солнца. Компоненты скорости Солнца, направленные к центру Галактики, на всех диаграммах демонстрируют большой разброс относительно аппроксимационных прямых регрессий, но от возраста не зависят (см. соответствующие коэффициенты корреляций). Высокозначимое изменение V -компоненты ($P \ll 1\%$), характеризующей угловой момент, говорит о том, что круговая скорость вращения вокруг галактического центра звездной группы любой металличности уменьшается с увеличением возраста входящих в нее звезд. При этом наклоны зависимостей в пределах неопределенностей остаются примерно одинаковыми, и отмеченное выше парадоксальное уменьшение углового момента звезд с увеличением их металличности наблюдается для каждого возраста — просто зависимость « $V_{\odot} - t$ » с увеличением металличности смещается по диаграмме

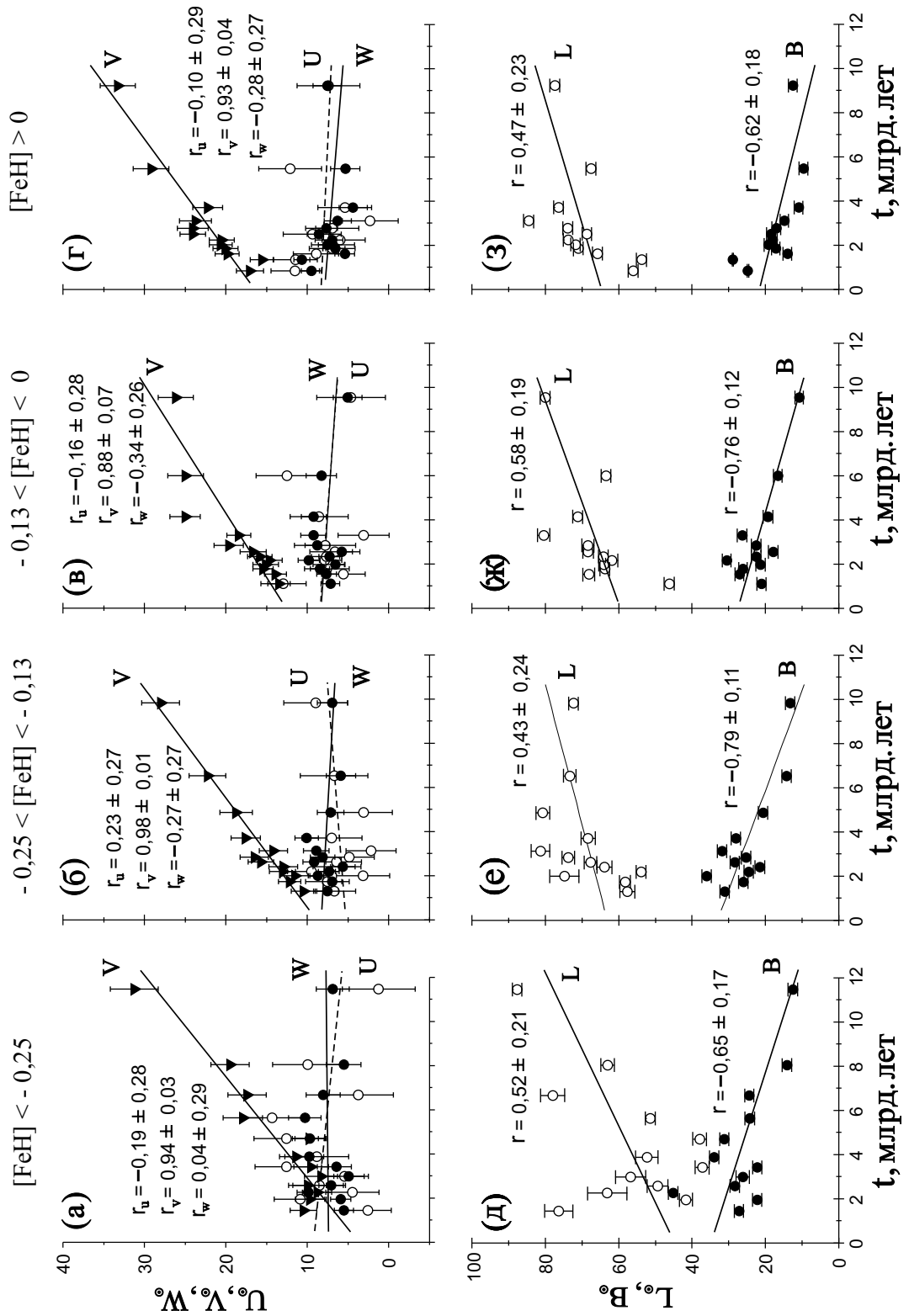


Рис. 1.6: Зависимости компонент скорости Солнца относительно соответствующих центроидов (первый ряд) и координат апекса солнечного движения (второй ряд) от возраста для четырех групп по металличности. Сверху указаны диапазоны металличности. Обозначения как на рисунке 1.3.

вверх параллельно самой себе. Величины компонент скоростей, направленных перпендикулярно плоскости Галактики, у всех групп примерно одинаковые и не зависят от возраста. Такие свойства компонент скоростей отразились и на поведении координат апекса солнечного движения относительно звездных групп разного возраста и металличности – наличие значимые тренды, демонстрирующие увеличение галактической долготы и уменьшение галактической широты с возрастом (см. второй ряд рисунка 1.6). В самой малометалличной группе наклон зависимости долготы апекса от возраста оказался самым большим, но затем он внезапно уменьшился, исключительно за счет увеличения долготы апекса солнечного движения относительно молодых звездных подгрупп и далее в диапазоне $[Fe/H] > -0.25$ ни наклоны, ни положения зависимостей не обнаруживают систематических изменений от металличности. Смещения по широте демонстрируют при переходе к более металличным группам постепенное уменьшение наклона во всем диапазоне металличности, характерном для галактического диска, и также исключительно за счет уменьшения широты апекса солнечного движения относительно молодых звезд.

1.6 Итоги первой главы

Holmberg et al. (2007) построили зависимости «возраст – дисперсии компонент скоростей» для близких звезд с надежно определенными возрастами и аппроксимировали их степенным законом. Их показатели степени γ получились равными: 0.38, 0.38, 0.54 и 0.40 для σ_U , σ_V , σ_W и $\sigma_{\text{полн}}$ соответственно (у Holmberg et al.(2009) – 0.39, 0.40, 0.53 и 0.40). Нами вычислялись величины полуосей эллипсоидов скоростей, которые в общем случае несколько отличаются от дисперсий компонент скоростей в галактической прямоугольной системе координат, поскольку большая ось эллипсоида, как правило, не совпадает с направлением на центр Галактики. В итоге для близких звезд все показатели степени зависимостей «возраст – величины полуосей», полученные по тем же данным, несколько изменились – 0.38, 0.39, 0.48 и 0.42 для σ_1 , σ_2 , σ_3 и $\sigma_{\text{полн}}$ соответственно. После исключения из выборки звезд, принадлежащих толстому диску, все показатели степени существенно уменьшились (см. рисунок 1.3 а). Однако они уменьшились в целом примерно в полтора-два раза после исключения из выборки звезд тонкого диска членов наиболее объемных звездных потоков: 0.22, 0.26, 0.27 и 0.24 (см.

рисунок 1.3 б). Видим, что больше всего уменьшился показатель степени для компоненты скорости, перпендикулярной галактической плоскости, хотя по-прежнему остался наибольшим. Исследованию зависимости от возраста W -компоненты скорости для близких звезд большое внимание уделено в работе (Seabroke, Gilmore (2007)), где использовался каталог Nordstrom et al.(2004). Их основной результат — опровержение выводов работ (Nordstrom et al.(2004); Holmberg et al.(2009)) о непрерывно продолжающемся в тонком диске возрастании дисперсии W -компоненты скорости с возрастом в пользу заключения о наступлении ее насыщения ≈ 4.5 млрд. лет назад. И как следствие — возможность аппроксимации зависимости «возраст – σ_W » не степенным законом, а суммой двух прямых, пересекающихся в окрестности 4.5 млрд. лет, и предложение принципиально иного механизма, ответственного за его возникновение – взаимодействие с другой галактикой. Действительно, в диапазоне 3–5 млрд. лет на рисунке 1.3 в можно заметить некоторое выполаживание зависимости «возраст – σ_z » (впрочем, выполаживание заметно и у двух других полуосей). Однако эта деталь, как мы отмечали, может оказаться артефактом, вызванным издержками методики определения наиболее вероятных возрастов звезд в исходном каталоге. Поэтому данный результат желательно в будущем перепроверить по независимым возрастам звезд, определенным другим методом.

Итак, в первой главе показано, что с увеличением возраста эллипсоид скоростей звезд тонкого диска смешанного возраста увеличивается в размерах, но форма его при этом почти не изменяется (точнее незначительно увеличивается). Практически не меняется от возраста и направление большей полуоси — эллипсоид все время сохраняет одинаковое и отличное от нуля отклонение вертекса. Одновременно весь он движется в Галактике так, что при увеличении возраста звездной группы заметно уменьшается его угловой момент, тогда как две остальных компоненты скорости остаются неизменными. В стационарной вращающейся звездной системе должно выполняться условие: $\sigma_2/\sigma_1 = (-B/(A - B))^{1/2}$. Если константы Оорта (A и B) принять равными $13.7 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}$ и $-12.9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}$ соответственно (Бобылев (2004)), то отношение средней полуоси к большой в Галактике должно быть равным 0.70. Поскольку же у нас для звезд любого возраста это отношение за пределами ошибок меньше ($\langle \sigma_2/\sigma_1 \rangle = 0.58 \pm 0.03$), Галактику в любой момент времени следует считать далекой от стационарности. (Впрочем, последнее заключение можно оспорить, приняв «стандартные» значения постоянных Оорта (15

и -10 км с^{-1}), при которых отношение полуосей как раз и должно быть равным 0.58.)

Параметры эллипсоидов скоростей оказались зависимыми и от металличности. По мере уменьшения металличности эллипсоид скоростей увеличивается в размерах, становится в среднем более сферичным и разворачивается по долготе в направлении на галактический центр. При этом выявилась явная парадоксальность поведения углового момента, когда при одинаковом возрасте с увеличением металличности монотонно уменьшается скорость вращения звезд вокруг галактического центра. В итоге, при возрасте ≈ 2 млрд. лет наиболее металличные звезды диска имеют средний угловой момент такой же, как и наименее металличные звезды с возрастом ≈ 8 млрд. лет. Данный факт невозможно объяснить релаксационными процессами в галактическом диске, поскольку они не могут приводить к систематическим изменениям скоростей звезд избранной металличности.

Несколько слов о причинах кинематических различий звездных населений в галактическом тонком диске. Результаты главы свидетельствуют, что релаксационные процессы, вызываемые спиральными волнами плотности, в состоянии объяснить степенной характер увеличения дисперсий U - и V -компонент скоростей звезд с увеличением возраста в направлении центра и вращения Галактики, при этом показатели степени следует принимать равными $\gamma_{1,2} \approx 0.25$, а не $0.3 - 0.4$, как обычно принимается. Получившееся несколько более высокое значение показателя для дисперсии вертикальной составляющей скорости $\gamma_3 \approx 0.27$ в пределах неопределенности совпадает с верхним теоретическим пределом, реализуемом в результате «разогревания» звезд только гигантскими молекулярными облаками без участия иных массивных объектов. Если полагать, что релаксационные процессы играют определяющую роль в эволюции диска, то остается непонятной существование лишь очень слабой, практически отсутствие зависимости от времени формы эллипсоида скоростей, причем всегда остающейся далекой от равновесной. С другой стороны, значительное уменьшение среднего углового момента звезд с увеличением их возраста свидетельствует о том, что звезды «помнят» динамическое состояние межзвездной среды, из которой они образовались, и релаксационные механизмы не привели к полному искажению начального распределения скоростей звезд. Существование у звезд одинакового возраста зависимостей параметров эллипсоидов скоростей от металличности также трудно объяснить исключительно релаксационны-

ми процессами, хотя у разных групп по металличности зависимости одноименных параметров от возраста отличаются мало. При этом у звезд с $[Fe/H] < -0.25$ (особенно при малом возрасте) резко отличающиеся в большую сторону величины дисперсий радиальной и азимутальной компонент скоростей и падающие практически до нуля отклонения вертекса свидетельствуют о том, что они, по-видимому, образовались из межзвездного газа с существенной долей вещества, выпавшего из внешних частей Галактики. В пользу этого предположения говорят и увеличенные по сравнению с солнечным относительные содержания в них α -элементов (см. Марсаков, Боркова (2006)). Однако самый большой в диске угловой момент у молодых малометаллических звезд и малые (как у остальных молодых звезд диска) дисперсии скоростей, перпендикулярных галактическому диску, не вполне согласуются с этим предположением. Трудно также понять, чем вызваны одинаковое у звезд любого возраста линейное возрастание отклонения вертекса и парадоксальное уменьшение углового момента при увеличении металличности. В этот ряд проблем следует, возможно, поставить и резкое уменьшение показателей степени зависимостей дисперсий скоростей от возраста у звезд с $[Fe/H] > 0.0$. Одним из наиболее перспективных путей объяснения всех отмеченных противоречий мы видим в подробном анализе радиальных миграций звезд разной металличности, оказавшихся в настоящее время вблизи Солнца в результате воздействия нерегулярностей галактического потенциала. Действительно, анализ элементов орбит ближайших звезд, проведенный в работе Наувуд (2008), показал, что более половины звезд с $[Fe/H] < -0.4$ демонстрируют свойства орбит, предполагающих их рождение во внешних областях галактического диска, тогда как подавляющая часть звезд с $[Fe/H] > 0.1$ – во внутренних.

Глава 2

Эволюция эллипсоидов скоростей в тонком диске галактики и радиальная миграция звезд

2.1 Введение

Вторая глава является логическим продолжением первой, в которой мы на основе данных обновленной версии женевско–копенгагенского обзора Holmberg et al. (2007) исследовали зависимости от возраста и металличности параметров эллипсоидов скоростей по корректно отобранным звездам тонкого диска Галактики. В ней, в частности, было показано, что с увеличением возраста эллипсоид скоростей близких к Солнцу звезд тонкого диска увеличивается в размерах, едва заметно округляет форму, слегка поворачивается в направлении галактического центра и теряет угловой момент. Такое поведение вполне согласуется с устоявшимися представлениями, согласно которым дисперсии скоростей звезд увеличиваются с возрастом под действием процессов релаксации, а сама подсистема становится все более равновесной. Однако одновременно продемонстрировано, что эллипсоид скоростей звезд смешанного возраста по мере уменьшения металличности увеличивается в размерах, обнаруживает слабую тенденцию к увеличению сферичности и разворачивается в направлении на галактический центр. Т. е. эллипсоид ведет себя подобно изменению с возрастом, но с уменьшением металличности скорость вращения вокруг галактического центра у звездных групп монотонно увеличивается(!), а не уменьшается. Последний эффект впервые был описан в работе Marsakov et al. (1990), где он был обнаружен по средним тангенциальным скоростям и металличностям близких звезд и получил название: «парадокс соотношения кинематика – металличность для звезд

диска Галактики». В первой главе мы высказали предположение, что возникновение регистрируемой по близким к Солнцу звездам тонкого галактического диска зависимостей параметров эллипсоидов скоростей от металличности может обуславливаться радиальной миграцией звезд.

Существование радиальной миграции звезд впервые предположил Grenon (1972), объясняя некоторые свойства близких звезд. (Поскольку речь в настоящем исследовании идет не о систематическом изменении положения звезд, а лишь о колебаниях их на некруговых орбитах, более корректно было бы назвать это явление радиальными движениями звезд, однако в статье мы сохранили устоявшийся в литературе термин.) Согласно современным представлениям, звезды, рождаясь из межзвездного вещества, движущегося по круговым орбитам, со временем увеличивают эксцентриситеты своих орбит в результате взаимодействия с возмущениями гравитационного потенциала Галактики. Однако средние радиусы их орбит остаются при этом, как полагают, практически неизменными, отражая галактоцентрические расстояния мест их рождения (Grenon (1987); Edvardsson et al. (1993)). В итоге, среди находящихся в настоящее время в околосолнечной окрестности звезд какая-то их часть мигрировала сюда с других галактоцентрических расстояний Naunton (2008) и это может искажать параметры эллипсоидов скоростей близких звезд. Действительно, если полагать, что в тонком галактическом диске звезды любой металличности образуются из межзвездного вещества, движущегося по круговым орбитам, то с увеличением возраста орбиты звезд разной металличности в среднем должны изменяться одинаковым образом. Однако оказалось, что величины полуосей эллипсоидов скоростей близких звезд систематически (хотя и незначительно) увеличиваются и с уменьшением металличности, тогда как отклонение вертекса, направление апекса солнечного движения и угловой момент звезд очень сильно изменяются с металличностью (см. рисунок 1.4). Похоже, что именно радиальная миграция звезд может привести к зависимости параметров эллипсоидов скоростей, определяемым по близким к Солнцу звездам, от металличности, поскольку в тонком диске присутствует отрицательный радиальный градиент металличности (см., например, Шевелев, Марсаков (1995)).

Данная глава посвящена детальной проверке влияния радиальной миграции звезд на параметры эллипсоидов скоростей близких звезд по той же выборке, что и в первой главе.

2.2 Наблюдательные данные

Кратко перечислим основные моменты построения нашей рабочей выборки звезд. Были использованы данные обновленной версии женевско-копенгагенского обзора Holmberg et al. (2007), содержащего возрасты, металличности, компоненты пространственных скоростей и элементы галактических орбит для ≈ 14000 F–G-карликов и субгигантов ярче $V \approx 8.5^m$. Вначале из этого обзора мы удалили двойные звезды, далеко проэволюционировавшие звезды ($\delta M_V > 3^m$) и звезды с неуверенно определенными возрастaми ($\varepsilon_t > \pm 3$ млрд. лет). Кроме того, чтобы избавиться от пограничных эффектов, мы ограничились диапазоном эффективных температур (5200 – 7000) К. Звезды тонкого диска были отобраны согласно модифицированной нами методике описанной в первой главе, изначально предложенной в работе Vensby et al. (2003) и вычисляющей вероятности принадлежности звезд подсистемам тонкого и толстого дисков по компонентам их пространственных скоростей. Для определения вероятностей мы использовали уточненные нами по данным женевско-копенгагенского обзора величины дисперсий каждой из трех компонент пространственной скорости ($\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W$), средние скорости вращения (V_{rot}) и относительные численности звезд в обеих дисковых подсистемах на солнечном галактоцентрическом расстоянии. Отметим, что наш кинематический критерий оказался хорошо согласованным с химическим составом звезд, а именно: при его использовании естественным образом минимизируется количество звезд с высокими относительными содержаниями магния в тонком диске и с низкими содержаниями – в толстом диске. Далее из выборки были удалены члены наиболее многочисленных движущихся групп – Сириуса, Гиад, Плеяд, Волос Вероники и ξ Геркулеса. В итоговой выборке осталось 4549 одиночных F–G-карликов и субгигантов тонкого диска Галактики, лежащих в окрестностях ≈ 150 пк от Солнца.

2.3 Зависимость параметров эллипсоидов скоростей звезд смешанного возраста и металличности от средних радиусов их орбит

Проверим вначале, как зависят параметры эллипсоидов скоростей звезд смешанного возраста и металличности от среднего радиуса их орбит. (Средний радиус орбиты $R_m = (R_a + R_p)/2$, где R_a – апогалактический, R_p – перигалактический радиусы орбиты звезды, а расстояние Солнца

от галактического центра принято здесь равным $R_0 = 8.0$ кпк.) Для этого нашу выборку мы разделили на 12 одинаковы по численности подгрупп в узких диапазонах по R_m и вычислили для каждой параметры эллипсоидов скоростей. Вычисление параметров эллипсоидов скоростей и скорости Солнца относительно локальных центроидов проводилось по формулам из монографии Огородников (1958), а их ошибок – по формулам из работы Паренаго (1951). Соответствующие зависимости приведены на рисунке 2.1. Как видно из первых двух графиков рисунка, ни величины полуосей, ни их отношения практически не зависят от R_m - все корреляции получились незначимыми ($P > 5\%$). Вероятности случайных возникновений наблюдаемых на графике (в) корреляций для $P_L \ll 1\%$, а $P_B > 5\%$ – это означает, что зависимость от R_m отклонений вертекса по долготе является высокосзначимой, тогда как по широте – незначимой. Однако, хотя координаты вертекса и обнаруживают хорошо прослеживаемые зависимости от R_m , но отклонения их от нуля нигде не превышают по абсолютной величине 3° , а их средние равны $\langle L \rangle = 0.7^\circ \pm 0.4^\circ$, $\langle B \rangle = 0.4^\circ \pm 0.3^\circ$, поэтому их можно считать несущественными. Справедливость такого заключения подтвердила наша проверка, когда мы разбили всю выборку на четыре группы по металличности и построили для каждой аналогичные графики. Оказалось, что наклоны зависимостей обеих координат отклонения вертекса от R_m ведут себя весьма беспорядочно у подгрупп звезд разной металличности и не обнаруживают никакой систематичности. В итоге можно заключить, что отклонения вертекса у звезд с разными R_m в пределах неопределенностей одинаковы и равны нулю. Зато интегральные показатели эллипсоидов демонстрируют весьма примечательное поведение. Так, особенно выделяется практически линейное и очень значительное уменьшение величины V -компоненты скорости Солнца с увеличением R_m ($P \ll 1\%$). Высокосзначимой оказалась и зависимость U -компоненты от R_m , но наклон у нее получился значительно меньше. Поскольку солнечное движение является отражением движения соответствующих центроидов, последнее означает, что угловой момент звезд уменьшается с уменьшением среднего радиуса их орбит. Это и понятно: на данном галактоцентрическом расстоянии медленнее вращаются вокруг галактического центра звезды, которые находятся ближе к апогалактическому радиусу своей орбиты. Уменьшается при этом и величина U -компоненты.

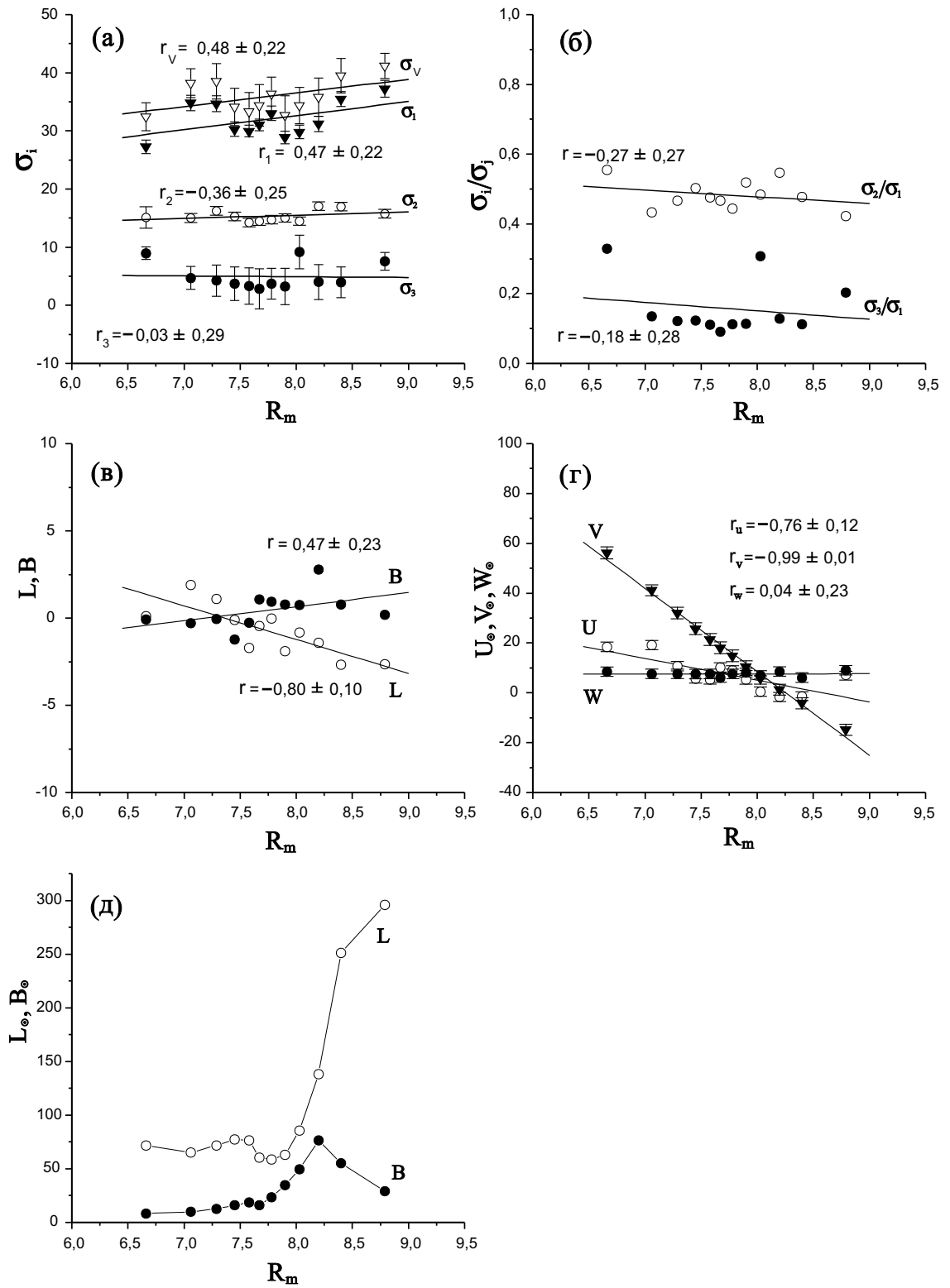


Рис. 2.1: Зависимости от среднего радиуса орбит полуосей эллипсоидов скоростей и полной остаточной скорости (а), отношений полуосей эллипсоидов (б), координат вертекса (в), компонент скоростей Солнца относительно соответствующих центроидов (г) и координат апекса солнечного движения (д) для близких звезд тонкого диска. Сплошные линии – прямые регрессии, цифры – коэффициенты корреляций с ошибками. На панели (д) регрессии не нанесены ввиду нелинейного характера зависимостей. Везде приведены ошибки, но в некоторых случаях ошибки определения параметров оказались меньше размеров значков.

Поскольку мы имеем дело со статистическими ансамблями и величины U - и V -компонент изменяются неодинаково, направление на апекс солнечного движения также зависит от фазы орбиты, на которой преимущественно находятся звезды в каждой подгруппе по R_m . Обе зависимости координат апекса получились высокозначимыми ($P \ll 1\%$), но они не были нанесены на рисунке, поскольку обе являются нелинейными: величина долготы апекса примерно постоянная при малых размерах орбит начинает резко увеличиваться после пересечения средним радиусом орбиты солнечного галактоцентрического расстояния. Широта апекса также вблизи этого радиуса начинает резко отклоняться от постоянной до того величины. Такое поведение объясняется тем, что вблизи солнечного радиуса орбиты все три компоненты скорости Солнца оказываются примерно равными друг другу по величине, и при дальнейшем увеличении R_m отношения их размеров становятся обратными. Достоверность поведения всех параметров эллипсоидов в зависимости от R_m мы проверили, разбив выборку на четыре группы по металличности. Оказалось, что все они демонстрируют практически одинаковые зависимости для всех параметров. Даже направление вертекса по широте обнаруживает у всех групп по металличности похожие колебания для высоких значений средних радиусов орбит.

Руководствуясь прямыми регрессиями, проведенными для каждой компоненты солнечного движения на рисунке 2.1г, можно определить скорость Солнца относительно локального центроида (т.е. местного стандарта покоя) звезд, рожденных на галактоцентрическом расстоянии, соответствующему нынешнему положению Солнца. Они получились равными: $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot})_{LSR} = (5.1 \pm 0.4, 7.9 \pm 0.5, 7.7 \pm 0.2)$ км с⁻¹.

Итак, видим, что от среднего радиуса орбиты оказываются зависимыми в первую очередь именно тангенциальная компонента скорости Солнца относительно соответствующего центроида звезд и, как следствие, долгота апекса солнечного движения, тогда как отклонение большой полуоси эллипсоида от направления на галактический центр существенно не меняется. Т.е. угловой момент звезд, находящихся в окрестности Солнца, действительно напрямую зависит от их среднего радиуса орбит. Рассмотрим теперь для звезд из узких диапазонов средних радиусов орбит зависимости от металличности только этих двух, наиболее отличившихся на рисунке 2.1 параметров эллипсоидов.

2.4 Зависимости апекса солнечного движения и углового момента для звезд с разными средними радиусами орбит от металличности

Для построения указанных зависимостей мы разделили исходную выборку на четыре примерно равные по численности группы по R_m значениями 7.37, 7.72 и 8.10 кпк, а затем каждую на 7 подгрупп по металличности. На левом графике рисунка 2.2 приведены зависимости от металличности V -компоненты, а на правом — долготы апекса движения Солнца относительно соответствующих центроидов для каждого диапазона по R_m . Видим, что зависимости углового момента для всех радиусов орбит оказались практически параллельными оси абсцисс. (Хотя в некоторых случаях корреляции и получились значимыми, но их наклоны меняются хаотически с изменением средних радиусов орбит звезд, что свидетельствует о селекционной природе этих зависимостей, обусловленной значительными ширинами всех диапазонов по R_m .) Для другого параметра — долготы апекса — можно отметить, что в отличие от полной выборки звезд тонкого диска, для которой наблюдается значимый рост величины « L » с увеличением металличности (см. рисунок 1.4 в), на панели (б) налицо везде обратные зависимости. При этом для всех диапазонов с $R_m < R_0$, зависимости практически параллельны оси абсцисс и только для диапазона с наибольшими средними радиусами орбит наклон получился значительным — сказывается большая ширина открытого диапазона. Примечательно, что относительно звездных подгрупп любой металличности апекс солнечного движения по долготе в этом диапазоне оказывается направленным в противоположную сторону, чем относительно звезд с меньшими средними радиусами орбит. Объясняется это тем, что угловые моменты звезд с большими орбитами оказываются на солнечном галактоцентрическом расстоянии больше, чем у Солнца, поскольку они дальше находятся от своего апогалактия, где тангенциальная компонента скорости минимальна.

Мы проследили также зависимости от металличности всех остальных параметров эллипсоидов скоростей звезд в узких диапазонах по R_m . Оказалось, что зависимости одноименных параметров не зависят от размеров орбит звезд. При этом только величины полуосей внутри каждой группы по R_m увеличиваются (правда, очень немного) с уменьшением металличности. Последнее, однако, объясняется довольно большими ширинами диапазонов по R_m , особенно в группе с самыми малыми радиусами орбит.

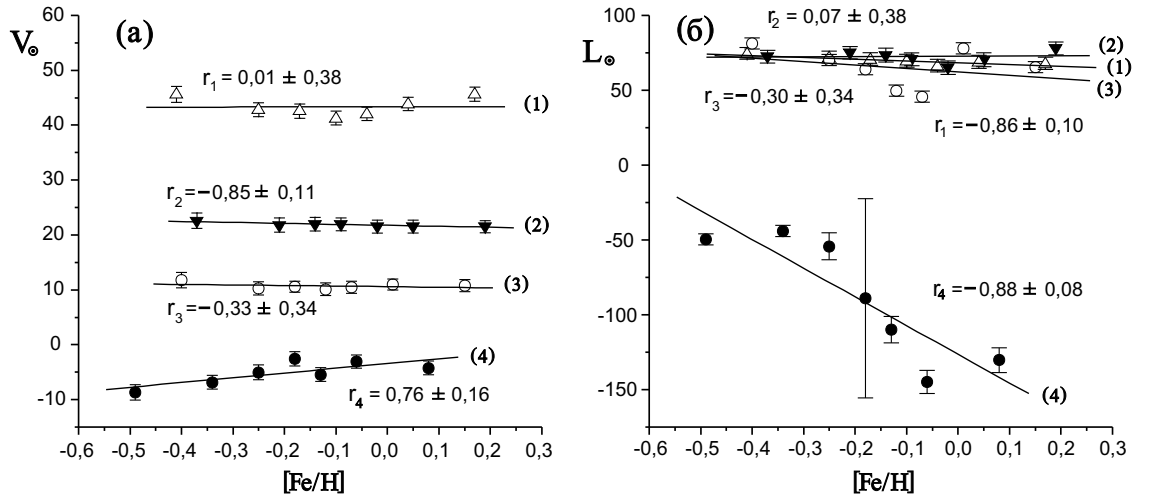


Рис. 2.2: Зависимости от металличности V -компоненты (а) и долготы апекса (б) движения Солнца относительно соответствующих центроидов для четырех групп звезд выборки тонкого диска в узких диапазонах средних радиусов орбит: ($R_m < 7.37$) – (1), ($7.37 < R_m < 7.72$) – (2), ($7.72 < R_m < 8.10$) – (3) и ($R_m > 8.10$) – (4) кпк. Обозначения как на рис. 2.1

Таким образом, можно заключить, что у звезд, имеющих одинаковые средние радиусы орбит, зависимостей параметров эллипсоидов скоростей от металличности не наблюдается. Посмотрим теперь, как поведут себя параметры эллипсоидов скоростей в зависимости от возраста у звезд, рожденных в узких диапазонах галактоцентрических расстояний, и будут ли у них наблюдаться столь значительные изменения углового момента с возрастом.

2.5 Зависимости параметров эллипсоидов скоростей звезд с разными средними радиусами орбит от возраста

Для построения указанных зависимостей мы разделили исходную выборку на четыре примерно равные по численности группы по R_m значениями 7.37, 7.72 и 8.10 кпк, а затем каждую на 12 подгрупп по возрасту. Поскольку определяющими параметрами эллипсоидов скоростей являются размеры их полуосей и величины компонент солнечного движения, мы приведем только их, а поведение вторичных параметров опишем словесно. В первом ряду рисунка 2.3 представлены зависимости от возраста величин полуосей эллипсоидов $\sigma_i(t)$ для всех четырех групп. Все зависимости аппроксимированы степенным законом вида $\sigma_i \sim t^\gamma$, где σ_i – дисперсия соответствующей компоненты скорости, а t – возраст звезд. Со-

ответствующие показатели степени указаны на рисунке рядом с каждой кривой. Величины коэффициентов корреляций не приведены, поскольку все зависимости оказались высокозначимыми ($P \ll 1\%$). Проследим изменение показателей степени одноименных зависимостей на всех панелях. Так, показатель степени у большой полуоси обнаруживает слабую тенденцию увеличиваться с увеличением среднего радиуса орбит: величины γ_1 первых двух групп за пределами ошибок меньше, чем на самой правой панели.

Показатель степени у второй полуоси систематического тренда не обнаруживает, но налицо неожиданно очень большие его значения в обеих средних группах и малые у обеих крайних групп. Видно, что различия в показателях степени получились из-за заметно большего размера полуосей эллипсоидов у подгрупп малого возраста на крайних панелях, тогда как у подгрупп с большими возрастами они для всех диапазонов по R_m примерно одинаковые. Причиной этого явилось отсутствие звезд с невозмущенными начальными орбитами в обеих крайних группах, обусловленное эффектами селекции. В противовес средним, малые полуоси наоборот, демонстрируют крайне небольшие и примерно одинаковые показатели степени у обеих групп с промежуточными величинами средних радиусов орбит, тогда как у обеих крайних групп величины γ_3 примерно в два раза больше и отличаются за пределами ошибок (см. надписи на панелях). Здесь величины полуосей у крайних групп получились из-за тех же эффектов селекции выше, чем у средних, во всем диапазоне возрастов. В итоге видим, что показатели степени зависимостей величин полуосей эллипсоидов от возраста зависят и от величин средних радиусов орбит звезд и от размеров диапазона по R_m , поэтому, чтобы получить неискаженные селекцией параметры эллипсоидов скоростей, следует отбирать звезды только со средними радиусами орбит, близкими к нынешнему галактоцентрическому расстоянию.

Проверка показала, что отношения полуосей во всех группах по R_m практически не зависят от возраста, но у обеих промежуточных групп последовательности отношений средней полуоси к большой и малой к большой лежат намного дальше друг от друга, чем у крайних групп, где сказываются эффекты селекции. Все зависимости отклонений вертекса от возраста оказались малозначимыми ($P \geq 5\%$) и у соседних подгрупп иногда меняют знаки, что свидетельствует, скорее всего, об их селекционной природе.

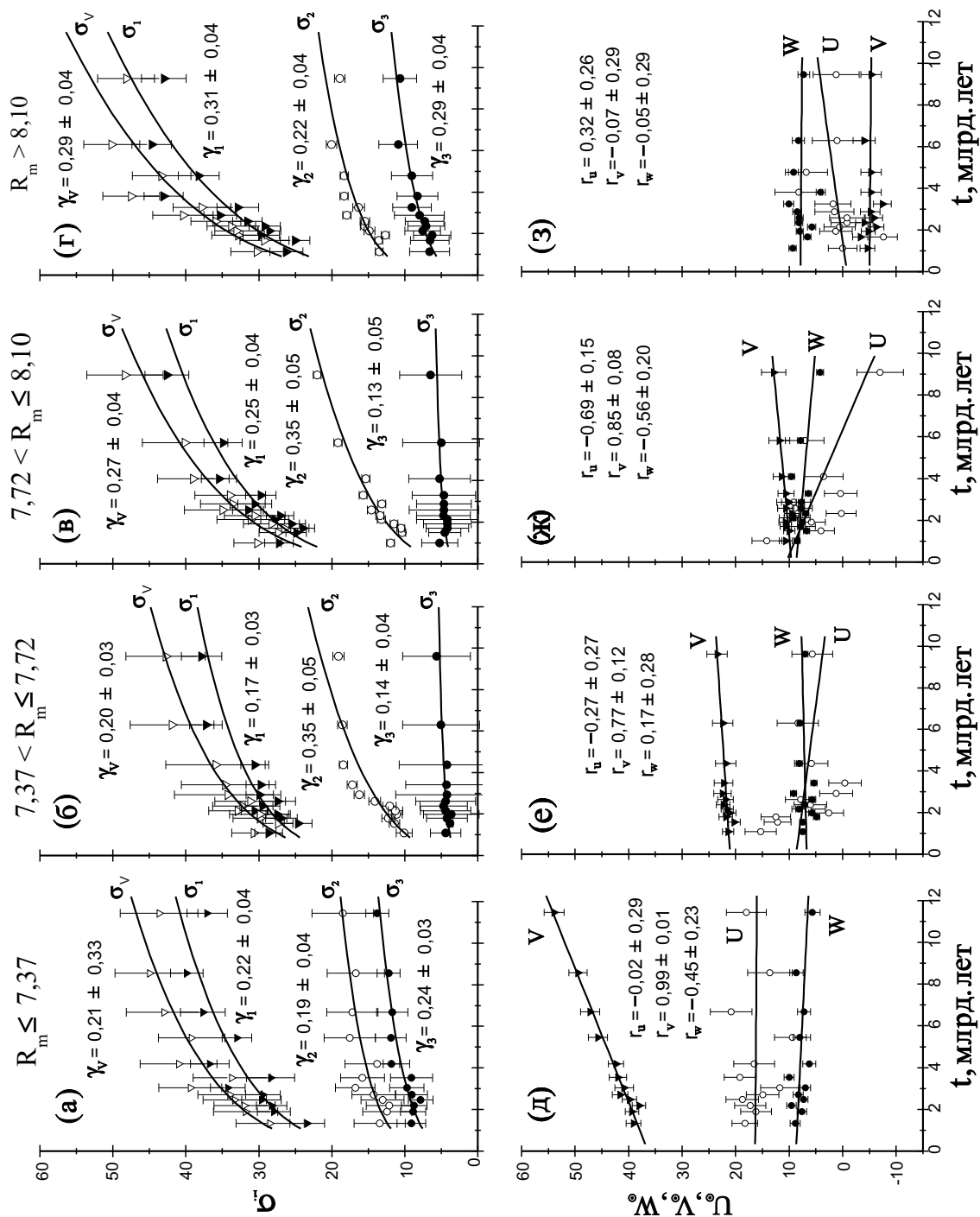


Рис. 2.3: Зависимости от возраста размеров полуосей эллипсоидов скоростей и полной остаточной скорости (верхний ряд) и компонент скоростей Солнца относительно соответствующих центроидов (второй ряд) для звезд тонкого диска из четырех диапазонов средних радиусов орбит (указаны сверху). Верхний ряд: кривые – аппроксимации зависимостей степенным законом, надписи на панелях – величины показателей степени с ошибками. Второй ряд: сплошные линии – прямые регрессии, цифры – коэффициенты корреляций с ошибками. Бары – ошибки определения соответствующих величин.

Во втором ряду рисунка 2.3 приведены зависимости от возраста интегральных параметров эллипсоидов у тех же групп звезд в узких диапазонах средних радиусов орбит. Видим, что зависимости для U -компоненты скорости Солнца относительно соответствующих центроидов не обнаруживают систематичности изменения наклонов. Более того, на трех панелях наблюдается малая значимость корреляций ($P > 5\%$), тогда как значимый наклон на рисунке 2.3 ж вызван исключительно одной самой удаленной точкой на графике, да и изменение U -компоненты происходит здесь в окрестности нулевого значения скорости. Наклон зависимости V -компоненты от возраста обнаруживает систематическое уменьшение с увеличением средних радиусов орбит (у группы с самыми большими орбитами он становится даже отрицательным). Причем значительное изменение углового момента с возрастом наблюдается только в группе с $R_m < 7.37$ и обусловлено это тем, что в ней средние радиусы орбит значительно отличаются от солнечного галактоцентрического расстояния и заключены в широком диапазоне, поэтому окрестностей Солнца достигают только звезды с большими эксцентриситетами орбит. В других группах наклоны пренебрежимо малы. Систематичность поведения наклонов свидетельствует, что для генеральной совокупности звезд, имеющих строго одинаковые средние радиусы орбит, средний угловой момент от возраста зависеть не должен. Из рисунка также видно, что наклоны W -компоненты беспорядочно меняют знак и малозначимы, кроме того они очень малы. Также статистически малозначимыми и несущественными оказались и наклоны зависимостей от возраста обеих координат апекса. В итоге можно заключить, что все три компоненты скорости Солнца относительно центроидов звезд смешанной металличности и разного возраста примерно одинаковы для звезд, рожденных на одинаковых расстояниях от центра Галактики.

Поскольку зависимости параметров эллипсоидов от возраста на рисунке 2.3 определяются не всегда уверенно, мы для проверки результатов несколько раз смещали граничные значения между группами вплоть до $\Delta R_m = \pm 0.3$ и заново строили те же зависимости. Выше мы сформулировали выводы, согласующиеся со всеми дополнительно построенными графиками. В частности, незначительный отрицательный наклон V -компоненты у звезд с большими орбитами (т.е. в открытом диапазоне по R_m) систематически увеличивается с удалением от солнечного радиуса орбиты нижней границы диапазона.

Таким образом, близкие звезды смешанной металличности демонстри-

руют различие зависимостей параметров эллипсоидов скоростей от возраста при разных значениях их средних радиусов орбит, которое можно полностью объяснить увеличением в выборке дефицита звезд с орбитами, близкими к круговым, при увеличении по абсолютной величине разницы $|R_{\odot} - R_m|$ для этой выборки. Посмотрим теперь, как поведут себя те же зависимости у звезд разной металличности.

2.6 Зависимости от возраста параметров эллипсоидов скоростей звезд разной металличности, рожденных на разных галактоцентрических расстояниях

Систематическое изменение параметров эллипсоидов скоростей от металличности мы уже описали, поэтому здесь остановимся только на изменениях с R_m у звезд разной металличности характеров их зависимостей от возраста. Для построения рисунка 2.4 звезды выборки мы разделили на две равные по численности группы значением $[Fe/H] = -0.13$ (что соответствует максимуму на распределении звезд диска нашей выборки по металличности) и затем каждую – на две группы по средним радиусам орбит значением $R_m = 7.70$ (примерно положение максимума на распределении звезд диска по R_m). Наиболее близкая к галактическому центру малометалличная (рисунок 2.3 а) и далекая металличная (рисунок 2.3 г) группы оказались меньше по численности из-за отрицательного градиента металличности в тонком диске.

На рисунке приведено поведение только определяющих параметров эллипсоидов — величин полуосей и компонент солнечного движения. Несмотря на недостаток численности звезд в группах и большие ошибки определения коэффициентов прямых регрессий в координатах $(\lg \sigma_i, \lg t)$, в первом ряду рисунка удается отследить у звезд разной металличности некоторые одинаковые тенденции в поведении зависимостей от возраста величин показателей степени. В частности, для большой полуоси в малометалличной группе с большими орбитами наблюдается за пределами ошибок более высокое значение показателя степени, чем в группе с малыми орбитами. Это возникло из-за того, что в близкой к галактическому центру малометалличной группе самые молодые звезды демонстрируют более высокие размеры больших полуосей, чем в далекой малометалличной группе.

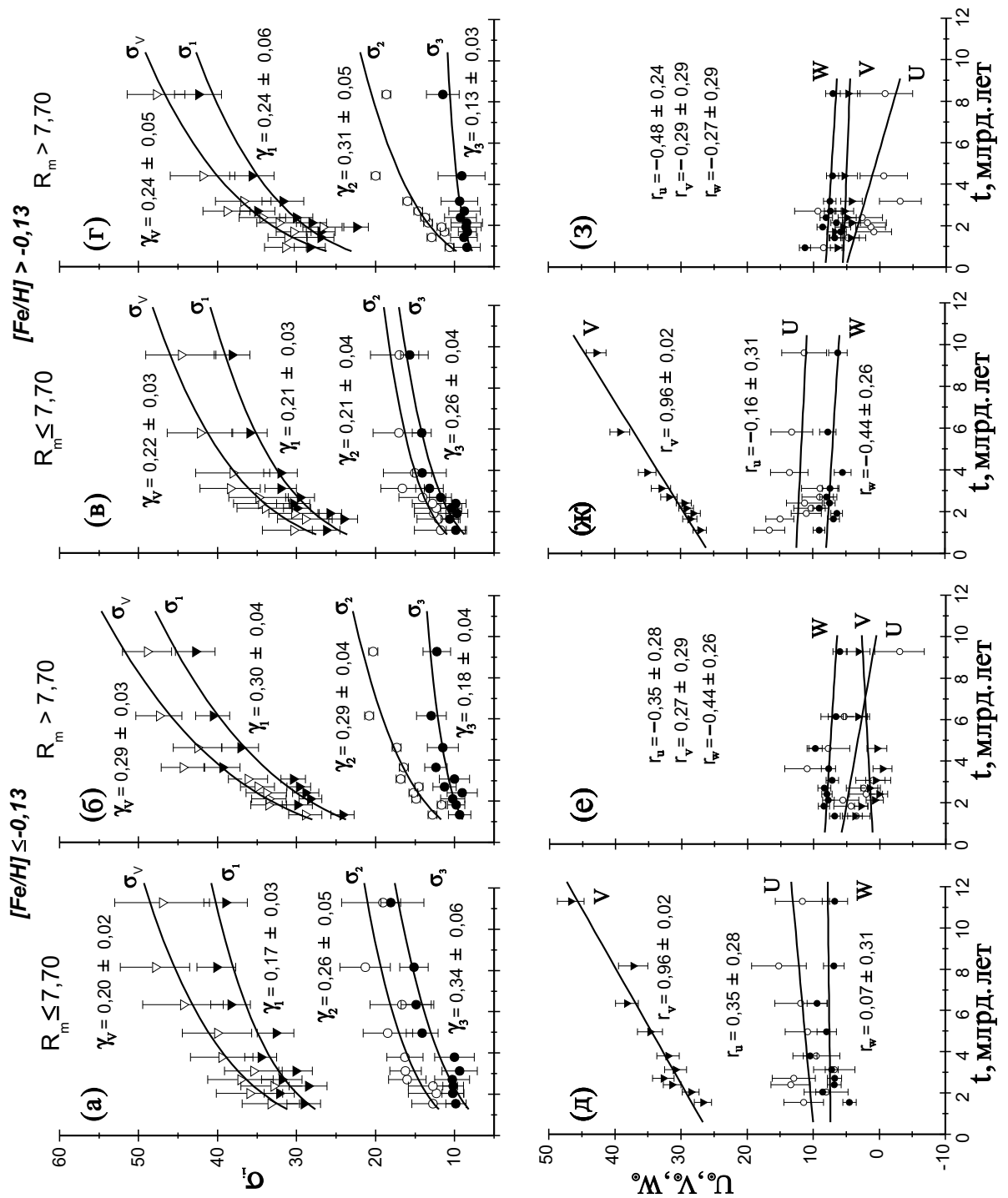


Рис. 2.4: Зависимости от возраста полуосей эллипсоидов скоростей и полной остаточной скорости (верхний ряд) и компонент скоростей Солнца относительно соответствующих центроидов (второй ряд) звезд тонкого диска, разделенных на две группы по металличности и каждая на две подгруппы по средним радиусам орбит (диапазоны указаны сверху). Надписи и обозначения как на рисунке 2.3.

У металлических звезд также есть аналогичное различие в показателях степени, правда находится оно в пределах ошибок. Здесь различие возникло из-за малых размеров полуосей у подгрупп больших возрастов в близкой металлической группе. Для средней полуоси можно заметить более высокие значения показателей степени у подгрупп с большими радиусами орбит. Причем у металлических звезд это различие находится за пределами ошибок. Для малой полуоси обе далекие группы демонстрируют за пределами ошибок более низкие значения показателей степени, чем у обеих близких групп. Возможные различия зависимостей от возраста отношений полуосей и направлений вертекса (на рисунке не приведены) тонут в ошибках. Мы полагаем, что различия в дисперсиях у подгрупп разного возраста при разных средних радиусах орбит возникают исключительно благодаря эффектам селекции, которые хотя несколько по-разному воздействуют на звезды разной металличности, но приводят к похожим результатам.

Во втором ряду рисунка 2.4 видно, что зависимости от возраста U - и W -компонент скорости Солнца относительно соответствующих центров не обнаруживают систематических различий. Кроме того, вероятности случайного образования всех корреляций $P \gg 5\%$. Зато тангенциальные компоненты скорости оказались в обеих близких подгруппах сильно зависимыми от возраста (у обеих $P \ll 1\%$) и практически совпадающими. Зависимости от возраста этих же компонент у групп звезд с большими R_m оказались незначимыми, при этом богатая металлами группа вообще демонстрирует, хоть и незначительный, но отрицательный наклон.

Таким образом, звезды разной металличности демонстрируют в пределах неопределенностей одинаковые изменения характеров зависимостей от возраста параметров эллипсоидов скоростей с увеличением размеров их орбит.

2.7 Зависимости от возраста параметров эллипсоидов скоростей звезд, рожденных на солнечном галактоцентрическом расстоянии

Итак, результаты данной главы свидетельствуют, что радиальная миграция звезд действительно искажает зависимости от возраста параметров эллипсоидов скоростей звезд, находящихся в настоящее время вблизи Солнца. Поэтому корректнее искать эти зависимости по звездам, име-

ющим примерно одинаковые средние радиусы орбит, причем родившимся на солнечном галактоцентрическом расстоянии. Для этого мы ограничили нашу начальную выборку одиночных близких звезд тонкого диска средними радиусами орбит $7.7 < R_m < 8.4$ кпк, поскольку в каталоге расстояние от центра Галактики до Солнца принято 8.0 кпк. Объем выборки получился равным 1853 звездам. В этом диапазоне практически отсутствует селекция, направленная против звезд с круговыми орбитами, правда одновременно в нем, скорее всего, существует некоторый дефицит звезд с сильно вытянутыми и далеко уходящими от галактической плоскости орбитами, поскольку большую часть времени звезды проводят вблизи наиболее далеких точек своей орбиты. Для построения рисунка 2.5 и отслеживания зависимостей параметров эллипсоидов скоростей от возраста мы разделили выборку на 17 подгрупп по 109 звезд в каждой. Аппроксимационные зависимости $\sigma_i(t)$ и надписи на графике (2.5 а) демонстрируют, что величины показателей степени для всех полуосей заметно изменились по сравнению с получаемыми по всем звездам тонкого диска из солнечной окрестности (см. ниже). В частности, несколько увеличилось (в пределах ошибок) величины γ для большой и средней полуосей и стали равными 0.26 ± 0.04 и 0.32 ± 0.03 соответственно. Зато очень сильно уменьшился показатель степени у малой полуоси и стал в пределах 3σ равным нулю ($\gamma_3 = 0.07 \pm 0.03$), т.е. дисперсия скоростей в направлении перпендикулярном галактическому диску оказалась практически независимой от возраста. Напомним, что по полной выборке близких звезд тонкого диска этот показатель всегда получался заметно больше, а не меньше, чем у двух других полуосей (см., например, глава первая, Holmberg et al.(2009); Nordstrom et al.(2004); Binney et al.(2000)). Показатель степени зависимости полной остаточной скорости от возраста практически не изменился — $\sigma_V = 0.26 \pm 0.03$. (Напомним, что для всех звезд тонкого диска из окрестностей Солнца показатели степени зависимостей величин полуосей и дисперсии полной остаточной скорости от возраста составляют 0.22 ± 0.03 , 0.26 ± 0.02 , 0.27 ± 0.02 и 0.24 ± 0.02 соответственно).

Отношение средней полуоси к большой на графике (б) не обнаруживает значимого изменения с возрастом (вероятность случайного возникновения корреляции $P \gg 5\%$) и в среднем равно $\langle \sigma_2/\sigma_1 \rangle = 0.49 \pm 0.01$. Отношение оказалось много меньше, чем в стационарной вращающейся звездной системе, когда выполняется условие: $\sigma_2/\sigma_1 = (-B/(A - B))^{1/2}$. При значениях $A = 13.7 \text{ км с}^{-1} \cdot \text{кпк}$, а $B = -12.9 \text{ км с}^{-1} \cdot \text{кпк}$ (Бобылев (2004))

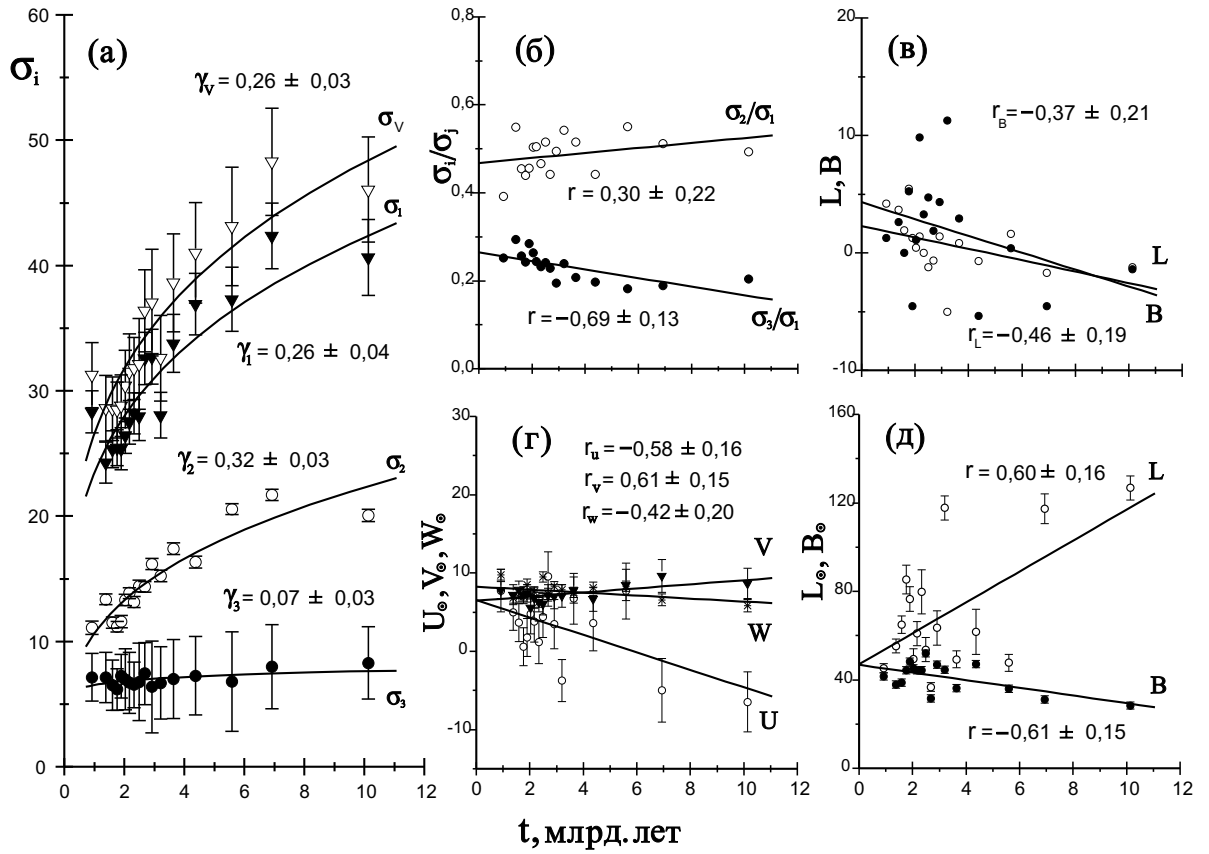


Рис. 2.5: Зависимости параметров эллипсоидов скоростей от возраста для одиночных F-G- звезд тонкого диска с ошибками определения возраста $\epsilon t < \pm 3$ млрд. лет, отобранных по нашему критерию, с исключенными звездами движущихся групп и в узком диапазоне средних радиусов орбит ($7.70 < R_m < 8.40$) кпк. Зависимости от возраста величин полуосей эллипсоидов скоростей и полной остаточной скорости (а), отношений полуосей эллипсоидов (б), координат вертекса (в), компонент скоростей Солнца относительно соответствующих центроидов (г) и координат апекса солнечного движения (д). Надписи и обозначения как на рисунке 2.3.

оно должно быть равным 0.70. Даже если принять «стандартные» значения постоянных Оорта (15 и -10 км с $^{-1}$), отношение полуосей все равно должно быть за пределами ошибок больше, получившегося здесь -0.58 . Величины отношений малой полуоси к большой демонстрируют значимое ($P < 1\%$), но незначительное уменьшение с возрастом, поскольку, как мы видели, дисперсия W-компоненты скорости очень слабо зависит от возраста. Кроме того, это отношение стало очень малым — $\langle \sigma_3/\sigma_1 \rangle = 0.23 \pm 0.01$. Обе координаты отклонения вертекса на графике (в) не обнаруживают значимых корреляций ($P > 5\%$), при этом они где-то в середине возрастного диапазона переходят через нулевые значения и далеко от него не отходят даже при самом молодом возрасте. Средние значения их равны: $\langle L \rangle = 0.7^\circ \pm 0.5^\circ$ и $\langle B \rangle = 1.9^\circ \pm 1.1^\circ$.

U - и V -компоненты скорости Солнца на графике (г) демонстрируют значимые корреляции ($\approx 1\%$). Наибольшее изменение наблюдается у U -компоненты скорости, однако если отбросить на диаграмме две крайние точки с самыми большими возрастами, то зависимость практически исчезает, что свидетельствует, скорее всего, о селекционном характере этой зависимости, связанной с широким диапазоном по R_m . Обе другие компоненты обнаруживают незначительную разницу своих величин на противоположных концах возрастного диапазона. Как результат – средние значения V -компонент у звездных подгрупп разного возраста оказались примерно одинаковыми, т. е. угловой момент не зависит от возраста.

Из-за заметного изменения U -компоненты и несущественного W -компоненты значимый наклон зависимости от возраста на графике (д) наблюдается только для долготы апекса солнечного движения ($\approx 1\%$), но и он, скорее всего, вызван эффектами селекции из-за сравнительно большой принятой нами ширины диапазона по R_m . Средние координаты апекса солнечного движения, согласно данным рисунка 2.5 д, получились равными: $\langle l_{\odot} \rangle = 70^{\circ} \pm 7^{\circ}$ и $\langle b_{\odot} \rangle = 41^{\circ} \pm 2^{\circ}$.

Для того чтобы убедиться в справедливости наших выводов о независимости от металличности параметров эллипсоидов скоростей звезд, рожденных вблизи солнечного галактоцентрического расстояния, мы разбили исследуемую в данном параграфе выборку на 11 подгрупп по $[Fe/H]$. Для каждой подгруппы как обычно мы вычислили параметры эллипсоидов скоростей и по ним построили интересующие нас зависимости. И действительно, оказалось, что все без исключения параметры продемонстрировали отсутствие ($P \geq 5\%$) их зависимостей от металличности (ввиду отсутствия положительной информации рисунок не приводится).

2.8 Итоги второй главы

Таким образом, в результате исключения влияния радиальной миграции звезд (т. е. эффектов селекции) заметно изменились не только определяемые величины параметров эллипсоидов скоростей звезд в тонком диске, но и их зависимости от возраста. Наиболее значимый результат заключается в исчезновении различия угловых моментов у звезд разной металличности и возраста — они у всех оказались практически одинаковыми. Это означает, что внутри тонкого диска угловой момент звезд нельзя использовать в качестве статистического индикатора их возраста. Эта величина для близко расположенных звезд диска оказалась, скорее, показателем

галактоцентрического расстояния их места рождения — скорость вращения вокруг галактического центра у таких звезд на солнечном галактоцентрическом расстоянии уменьшается с уменьшением среднего радиуса их орбит.

Компоненты скорости Солнца относительно местного стандарта покоя $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot})_{LSR} = (5.1 \pm 0.4, 7.9 \pm 0.5, 7.7 \pm 0.2)$ км с⁻¹, полученные в работе методом интерполяции на солнечное галактоцентрическое расстояние, несколько отличаются от обычно используемых. Например, в работе Dehnen, Binney(1998) компоненты, полученные по собственным движениям 14000 близких карликов из каталога HIPPARCOS, равны $(10.0 \pm 0.4, 5.3 \pm 0.6, 7.2 \pm 0.4)$ км с⁻¹, тогда как Бобылев, Байкова (2007) по данным каталога Nordstrom et al.(2004) путем экстраполяции к нулевому значению дисперсий остаточных скоростей получили $(8.7 \pm 0.5, 6.2 \pm 2.2, 7.2 \pm 0.8)$ км с⁻¹. При условии справедливости исходного предположения о неизменности средних радиусов орбит звезд, метод определения скорости Солнца относительно местного стандарта покоя, использованный в настоящей работе, представляется более надежным и лишенным систематических смещений, неизбежных как при экстраполяции, так и при использовании выборки, где присутствуют звезды разного возраста, рожденные на разных расстояниях от центра Галактики.

Зависимости от возраста параметров эллипсоидов скоростей также претерпели значимые изменения. Так, показатели степени зависимостей от возраста величин большой, средней и малой полуосей стали равными 0.26 ± 0.04 , 0.32 ± 0.03 и 0.07 ± 0.03 соответственно. Т.е. величины γ_1 и γ_2 остаются естественно объясняемыми релаксационными процессами, связанными со стохастическими спиральными волнами плотности (см. Simone et al. (2004)). Весьма малая величина показателя степени для дисперсии скоростей перпендикулярной к галактической плоскости теперь дает возможность предположить, что и для этой компоненты актуальным может оказаться «разогревание» только спиральными волнами плотности. Напомним, что для объяснения ранее получаемой большей величины этого показателя необходимо было привлечение «разогревание» звезд молекулярными облаками (Hanninen, Flynn (2002)) или даже скоплениями темной материи от распавшихся галактик–спутников под действием приливных сил нашей Галактики (Benson et al. (2013)).

Таким образом, показано, что с увеличением возраста эллипсоид скоростей звезд тонкого диска, рожденных на солнечном галактоцентрическом расстоянии, увеличивается в размерах только в плоскости диска,

тогда как в перпендикулярном ему направлении остается практически неизменным. Форма его все время остается далекой от равновесной, а направление его большой полуоси не меняется с возрастом — эллипсоид все время сохраняет одинаковое и в пределах неопределенностей равное нулю отклонение вертекса ($\langle L \rangle = 0.7^\circ \pm 0.6^\circ$, $\langle B \rangle = 1.9^\circ \pm 1.1^\circ$). При этом обе координаты апекса солнечного движения остаются в пределах ошибок независимыми от возраста и равными $\langle l_\odot \rangle = 70^\circ \pm 7^\circ$ и $\langle b_\odot \rangle = 41^\circ \pm 2^\circ$.

Глава 3

Зависимость

«возраст–металличность» в тонком диске Галактики

3.1 Введение

Время существования подсистемы тонкого диска сравнимо с возрастом самой Галактики, поэтому непрерывно продолжающийся процесс синтеза химических элементов за этот период должен привести к заметному увеличению общего содержания тяжелых элементов в более молодых звездах подсистемы. В итоге в тонком диске должен наблюдаться хорошо выраженный тренд металличности от возраста и самые большие металличности должны быть у самых молодых звезд. Однако, несмотря на многочисленные исследования данной темы, вопрос о существовании такой зависимости по-прежнему остается открытым.

Первое систематическое исследование характера связи между возрастом и металличностью в галактическом диске выполнено Twarog (1980) для ~ 1000 звезд поля по данным среднеполосной фотометрической системы Стремгрена, позволяющей проводить трехмерную классификацию звезд. Результат «оправдал» ожидания, поскольку было продемонстрировано, что действительно, начиная от самых старых звезд подсистемы, металличность равномерно увеличивается с уменьшением возраста. Stromgren (1984) подчеркнули другой аспект зависимости Тварога «возраст–металличность»: очень маленькую дисперсию металличности $\sigma_{[Fe/H]}$, у звезд данного возраста, лишь слегка превышающую ожидаемый разброс, вызываемый ошибками наблюдений.

В дальнейшем оба эти вывода оспаривались. Так, на базе *uvby*-фотометрии для ~ 5500 F2–G2-карликов диска (Marsakov et al. (1990)),

используя кинематику в качестве статистического индикатора возраста звездной группы, показали, что зависимость между возрастом и металличностью является «двумерной» со следующими основными свойствами: большой разброс содержания металлов у старых звезд и сужение разброса металличности с одновременным увеличением средней металличности в сторону уменьшения возрастов.

В работе Edvardsson et al. (1993) на основе более надежных спектроскопических определений содержания железа и изохронных возрастов примерно для 200 звезд диска установлено, что реальный разброс металличности у звезд одинакового возраста значимо больше наблюдательных ошибок. Одновременно обращено внимание на существование в подсистеме очень старых звезд с высокой металличностью. В последней работе также утверждается, что «если в диске и существует зависимость средней металличности от возраста, то очень слабая». Однако во всех этих ранних работах уже *a priori* имеется селекция, заключающаяся в ограничении выборок звезд с низкотемпературной стороны спектральным классом G2, что приводит к заведомому исключению возможно существующих старых металлических звезд, точка поворота для которых, согласно теоретическим расчетам, лежит в области более низких температур (см. наклонную штриховую линию, соответствующую $T_{eff} = 5800$ К, на рисунке 3.2).

В недавних работах (Feldzing et al. (2001); Holmberg et al.(2009)), основанных на новых оригинальных данных *uvby*-фотометрии и спутниковых астрометрических данных для нескольких тысяч звезд диска, включены звезды до конца спектрального диапазона G и даже более поздние. Возрасты в работе Feldzing et al. (2001) определены по теоретическим эволюционным трекам, используя алгоритм минимизации для каждой звезды разностей между наблюдаемыми и теоретическими значениями абсолютной звездной величины и эффективной температуры. Данный алгоритм исключает стадию точки поворота главной последовательности, где изохроны допускают существование звезд с одинаковыми параметрами атмосфер, но разными возрастами. Работы (Nordstrom et al.(2004); Holmberg et al.(2009)) представляют собой: первая — основную, а вторая — исправленную за систематические ошибки звездных параметров версию женевско-копенгагенского обзора. В них использован метод определения возрастов по теоретическим изохронам, основанный на Байесовской теории решения (см. Sivia (1996)). Метод учитывает систематические эффекты и позволяет более достоверно оце-

нивать возрасты звезд по функции распределения вероятности. Все шкалы согласованы с возрастными, полученными на основе хромосферной активности звезд. В перечисленных работах доказываются существование очень старых сверхметаллических звезд и одновременно утверждается, что все обнаруживаемые на диаграмме «возраст – металличность» детали, обуславливающие наблюдаемую корреляцию, обязаны тем или иным эффектам селекции. В частности в работе Nordstrom et al. (2004) утверждается, что наблюдаемое более высокое значение средней металличности у звезд моложе 3 млрд. лет обусловлено двумя искусственно созданными причинами. Во-первых, ограничением выборок с высокотемпературной стороны и, во-вторых, наличием в выборках, отобранных только по видимой звездной величине, далеких горячих звезд высокой светимости, чья «сверхметалличность» обусловлена исключительно «переисправлением» данных фотометрии за межзвездное покраснение.

Однако исследуя традиционную методику определения изохронных возрастов, Pont, Eyser (2004) указали, что нелинейное разделение изохрон на диаграмме Герцшпрунга–Рессела приводит к статистической селекции при определении изохронных возрастов звезд, искусственно приписывая им больший возраст. Анализируя ошибки в определении параметров атмосфер и изохронных возрастов звезд в работе Edvardsson et al. (1993) авторы Pont, Eyser (2004) приходят к выводу, что представление старыми богатыми металлами ($t > 5$ млрд. лет, $[Fe/H] \sim 0.0$) и молодыми бедными металлами ($t < 5$ млрд. лет, $[Fe/H] < -0.5$) звезд является ошибочным. Систематические ошибки в возрастах этих звезд они объясняют чрезмерно упрощенной методикой определения возрастов по теоретическим изохронам, и утверждают, что если использовать правильный статистический метод, исправляющий эту селекцию, то окажется, что данные Женевско–копенгагенского каталога указывают на «монотонное возрастание» металличности в галактическом диске при приближении к настоящему времени при дисперсии $\sigma_{[Fe/H]} < 0.15$ у звезд одного возраста.

В согласии с последним выводом находятся и результаты работ (Rocha-Pinto et al. (2000); Rocha-Pinto et al. (2004)), где используя данные о хромосферной активности в нескольких сотнях близких карликов главной последовательности для оценки их возрастов, найден значительный тренд средней металличности при довольно малой дисперсии ($\sigma_{[Fe/H]} \sim 0.12$) у звезд одного возраста. (Заметим однако, что фотометрические металличности в данной работе очень плохо коррелируют со спектроскопическими.) Впоследствии Rocha-Pinto et al. (2006) заявили, что о

существовании зависимости между возрастом и металличностью в тонком диске свидетельствует также убывание средней металличности как с увеличением, так и с уменьшением среднего радиуса орбит звезд, расположенных в настоящее время вблизи Солнца. Действительно, в предположении, что средний радиус орбит звезд является индикатором галактоцентрического расстояния их места рождения (Edvardsson et al. (1993); Grenon (1987)), наблюдаемое по близким звездам поля увеличение разницы между средними радиусами орбит звезд и солнечным кругом с увеличением их возраста означает, что в диске средняя металличность с возрастом убывает. (Заметим, что ранее Шевелев, Марсаков (1995) именно уменьшением металличности с возрастом в галактическом диске объяснили наблюдаемый излом на зависимости средней металличности звезд этой подсистемы от среднего радиуса их орбит.)

В работе (Reid et al. (2010)) для исследования зависимости между возрастом и металличностью по данным каталога Hipparcos составлена репрезентативная выборка близких звезд. Характерной особенностью выборки явилось то, что в нее включены только звезды, у которых время жизни на главной последовательности сравнимо или превышает возраст тонкого диска (т. е. с $M_V > +4^m$). Снизу выборка ограничена значением абсолютной звездной величины $M_V < +6^m$, что делает ее для карликов $F5 - K0$ полной в пределах ≈ 30 пк. Металличности звезд они определили с помощью калибровки Haywood (2002) по данным фотометрии Стремгрена, причем, как авторы сами отмечают, металличности у них получились систематически выше на $\Delta[Fe/H] \approx 0.1$, чем в работе Edvardsson et al. (1993). Примечательно, что возрасты, найденные ими на основе Йельских изохрон Demarque et al. (2004), неплохо коррелируют с возрастaми Edvardsson et al. (1993), но совершенно не коррелируют с возрастaми из работы Nordstrom et al. (2004). В итоге Reid et al. (2010) получили, что средняя металличность в околосолнечной окрестности увеличивается от $\Delta[Fe/H] \approx -0.3$ при возрасте 10 млрд. лет до $\approx +0.15$ к настоящему времени, хотя дисперсия металличности в любую эпоху оказалась довольно высокой.

Автор работ (Haywood (2006); Haywood (2008)) проанализировал кинематику близких звезд и показал, что элементы орбит самых металлических и наименее малометаллических звезд, находящихся в настоящий момент в околосолнечной окрестности, предполагают рождение большинства из них во внутренних и внешних областях галактического диска соответственно. В итоге, как он отмечает, на наблюдаемой диаграмме

«возраст – металличность» можно зафиксировать лишь отсутствие малометаллических звезд моложе 2 млрд. лет и увеличение дисперсии металличности с возрастом. Он заключает, что на солнечном галактоцентрическом расстоянии звезды тонкого диска рождались в узком диапазоне металличности ($-0.2 < [Fe/H] < 0.2$) и это, по его мнению, подтверждает гипотезу о том, что химическая эволюция в Галактике в основном предшествовала формированию дисковой подсистемы. Одновременно, Roskar et al. (2009) численно промоделировали гидродинамические процессы при формировании галактического диска и заявили, что наблюдаемое практическое отсутствие наклона и большой разброс на диаграмме «возраст – металличность», а также сравнительно малое количество молодых малометаллических звезд в околосолнечной окрестности можно объяснить радиальной миграцией звезд.

Однако Karatas et al. (2005) полагают, что сделать окончательное утверждение о существовании зависимости между возрастом и металличностью в тонком диске в диапазоне $t > 3$ млрд. лет не позволяют разброс металличности среди звезд одного возраста и существование старых, богатых металлами звезд, подтвердив тем самым выводы работ (Feldzing et al. (2001); Nordstrom et al.(2004)). Такое заключение было ими сделано на основе исследования выборки, содержащей более четырехсот звезд, которые они выделили в подсистему тонкого диска по критерию Schuster et al.(2004), использующем информацию как о кинематике, так и о металличности звезд. Причем они использовали только карлики точек поворота и субгиганты, поскольку для них можно с высокой точностью определить изохронные возрасты.

Ввиду того, что существование монотонного изменения металличности в тонком диске с возрастом все еще остается недоказанным, целью является тщательный анализ всевозможных селекционных эффектов, способных исказить вид наблюдательной диаграммы «возраст – металличность», и исследование изменения характера этой зависимости по звездам, рожденным на разных галактоцентрических расстояниях. Для увеличения надежности результатов наряду с фотометрическими металличностями привлекаются спектроскопические определения содержаний железа и магния в звездах, а также независимые определения возрастов.

3.2 Наблюдательные данные

В качестве основного источника в данной главе использовалась новая версия женевско–копенгагенского обзора (Holmberg et al.(2009)), содержащая параметры атмосфер, возрасты, металличности и кинематику для 14 000 F–K- карликов, а в качестве дополнительного — сводный каталог спектроскопических определений содержаний железа и магния в 867 звездах с точными параллаксами (Боркова, Марсаков (2005)). Параметры атмосфер и металличности в первом каталоге определены по индексам *uvby*–фотометрии, исправленным за межзвездное покраснение. На рисунках 3.1 а,б нанесены звезды, присутствующие одновременно в обоих каталогах. На обоих графиках проведены линии, соответствующие совпадению сравниваемых величин, а также прямые регрессии. Видно, что фотометрические определения металличности и эффективной температуры для подавляющего числа звезд в пределах ошибок их определений совпадают со спектроскопическими из сводного каталога (Боркова, Марсаков (2005)). При этом оба фотометрических параметра не обнаруживают в целом систематических смещений, но только небольшие наклоны прямых регрессий относительно медианных прямых. В итоге у самых богатых тяжелыми элементами звёзд наблюдается небольшое систематическое занижение металличности на $\Delta[Fe/H] \leq 0.1$, а у самых горячих звезд наблюдается небольшое систематическое занижение температуры на $\Delta T_{eff} \leq 50$ К. Столь незначительные отклонения не приводят к существенному увеличению заявленных авторами ошибок определений возрастов для абсолютного большинства звезд каталога.

Расстояния примерно для 75 % звезд в работе Holmberg et al.(2009) определены из тригонометрических параллаксов каталога HIPPARCOS, причем авторы использовали только параллаксы с ошибками менее 13 %. Для звезд с отсутствующими параллаксами или с их большими ошибками использованы фотометрические расстояния. Заявленная для них точность также составляет 13 %. Анализ ошибок тригонометрических параллаксов показал, что фотометрические расстояния в каталоге приняты в основном для далеких звезд, тогда как для 98 % звезд в пределах 70 пк оставлены тригонометрические расстояния.

В работе (Holmberg et al.(2009)) вычисляли наиболее вероятные возрасты звезд на основе Падуанских теоретических изохрон (Girardi et al. (2000); Salasnich et al. (2000)), учитывая ошибки определения их эффективных температур, абсолютных звездных величин и металличностей.

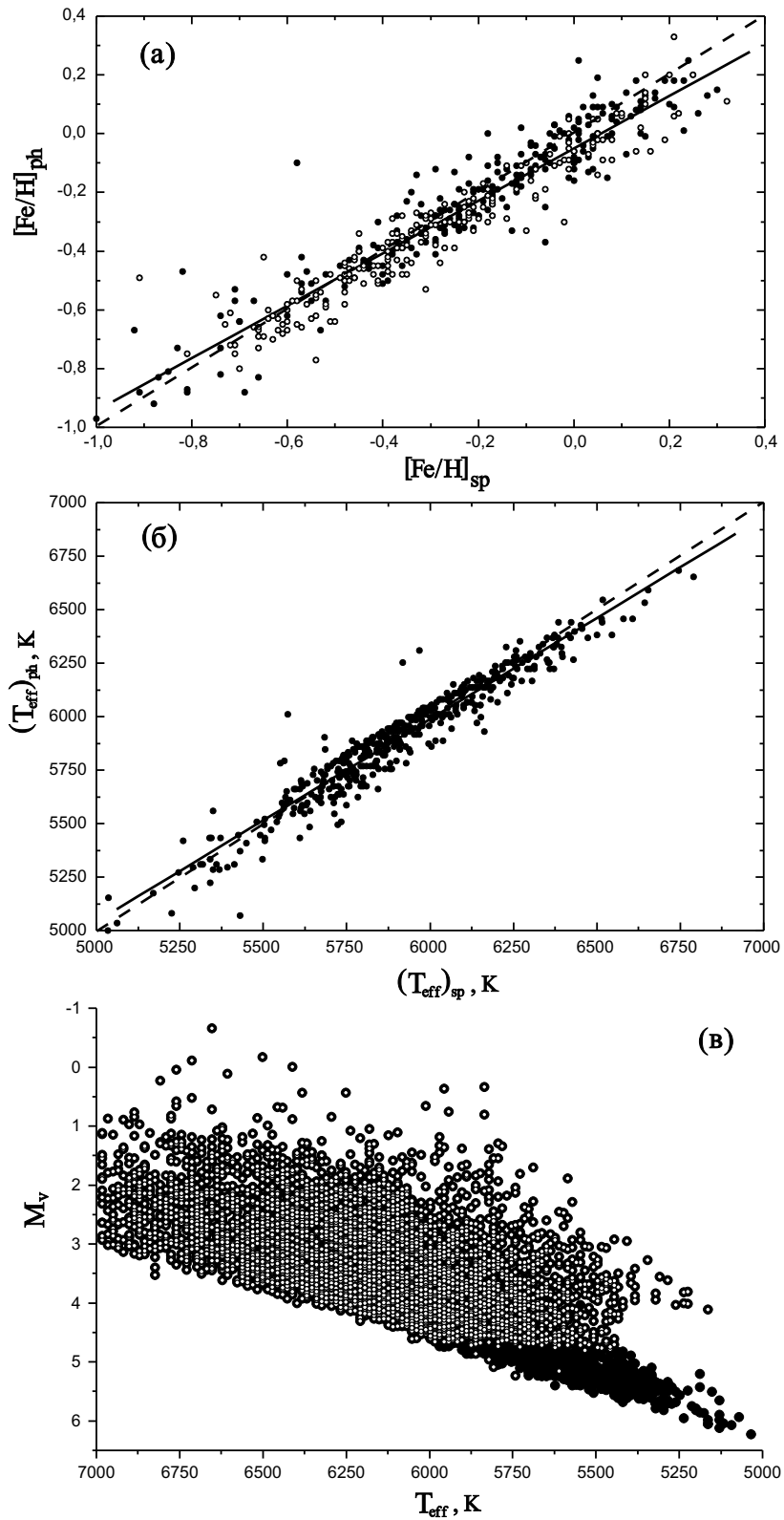


Рис. 3.1: Сравнение фотометрических и спектроскопических определений металличности (открытыми кружками выделены звезды старше 5 млрд. лет) (а) и эффективных температур (б); диаграмма «эффективная температура – абсолютная звездная величина» (в): мелкие значки – все звезды из исходного каталога, открытые кружки – звезды с ошибками возрастов $\epsilon_t < \pm 3$ млрд. лет. На обеих панелях сравнения пунктиром проведены прямые, соответствующие совпадению сравниваемых величин. Сплошные линии – прямые регрессии (а, б).

К сожалению, автоматически учитываемая при этом переменность «скорости» перемещения звезд вдоль эволюционных треков привела к искажению возрастов звезд, находящихся в окрестностях точек поворота, поскольку на этом участке звезды эволюционируют сравнительно быстро и вероятность нахождения их на этой стадии крайне низка. В результате звездам, находящимся вблизи эволюционной стадии, соответствующей выгоранию последнего процента водорода в ядре накануне его коллапса, был приписан более молодой возраст.

Искажение возраста коснулось только звезд с такой металличностью, при которой соседние изохроны в области точек поворота имеют сложную форму и пересекаются. Воочию этот эффект можно увидеть на диаграмме «возраст – абсолютная звездная величина», построенной для всех звезд каталога на рисунке 1.1 (хотя диаграмма построена по данным предыдущей версии каталога Holmberg et al. (2007), но ее характер сохранился и в новой редакции). На диаграмме отчетливо выделяются две отдельные последовательности, которые в районе 2 млрд. лет смыкаются из-за существенного удаления точек поворота от начальной главной последовательности у более «молодых» изохрон с высоким содержанием тяжелых элементов, а в области $t > 5.5$ млрд. лет пробел между ними заполняется более старыми звездами, проэволюционировавшими дальше своей точки поворота. Мы посчитали все же возможным использовать данные каталога, поскольку неопределенности в «назначении» возрастов для звезд точек поворота, как видно из этого рисунка, менее одного миллиарда лет. Да и сами авторы работы подчеркивают, что их процедура вычисления возрастов не искажает общий ход тренда на диаграмме «возраст – металличность». Анализ ошибок определения возрастов в обзоре Holmberg et al. (2009) показал, что средняя ошибка $\varepsilon_t < \pm 2$ млрд. лет достигается для 85% звезд, а ошибка $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет – для 90% звезд каталога. Лучевые скорости получены в разное время авторами Holmberg et al. (2009) в рамках проекта «CORAVEL», а собственные движения в основном взяты из каталога TYCHO-2. В итоге заявляемая ими точность определения компонентов скоростей звезд равна 1.5 км с^{-1} . Параметры орбит вычислены ими на основе гравитационного потенциала Галактики из работы Flynn et al. (1996), предполагающего солнечное галактоцентрическое расстояние 8 кпк и скорость вращения тонкого диска на этом расстоянии 220 км с^{-1} .

По методике, предложенной в первой главе, отобрали для исследования звезды, вероятность принадлежности которых подсистеме тонкого

диска больше вероятности принадлежности толстому диску. В методике используются полученные в той же работе дисперсии каждой из трех компонент пространственных скоростей и средние скорости вращения обеих подсистем на солнечном галактоцентрическом расстоянии. Проверка по нашему сводному каталогу спектроскопических определений содержаний железа и магния в близких звездах (Боркова, Марсаков (2005)) показала, что данный кинематический критерий очень хорошо согласуется с химическими критериями, согласно которым абсолютное большинство отобранных таким образом звезд тонкого диска имеют низкие величины отношений $[Mg/Fe] < 0.25$ и высокие значения $[Fe/H] > -0.5$ (см., в частности, Fuhrmann (2000); Марсаков, Сучков (1977)).

После удаления отмеченных в каталоге двойных звезд, далеко проэволюционировавших звезд ($\delta M_V > 3^m$) и звезд с неуверенно определенными возрастaми ($\varepsilon_t > \pm 3$ млрд. лет), в выборке осталось 5805 предположительно одиночных звезд тонкого диска. (Напомним, что итоговая средняя ошибка определения возраста для звезд получившейся выборки составила $\langle \varepsilon_t \rangle = 1.0$ млрд. лет.) На рисунке 3.1в приведена диаграмма «эффективная температура – абсолютная звездная величина» для полученной таким образом выборки звезд тонкого диска (для сравнения мелкими значками нанесены все звезды тонкого диска из исходного каталога). Как видим, надежно определить возрасты удастся только для звезд с абсолютными величинами $M_V \approx 4.6^m$: менее светимостные звезды попадают на диаграмме в область, где изохроны проходят столь густо, что ошибки определения возраста становятся очень велики. В получившейся выборке тонкого диска звезды перекрывают довольно значительный диапазон эффективных температур $\approx (5400 - 7000)$ К, в который заведомо попадают как самые старые, так и очень молодые звезды подсистемы.

Анализ, проведенный в первой главе, показал, что левое крыло распределения звезд этой выборки по расстояниям от Солнца (d) хорошо аппроксимируется степенным законом. Причем, в диапазоне $d < 60$ пк показатель степени в пределах ошибки равен двум, какой и должен наблюдаться в случае равномерного распределения звезд в исследуемом объеме. Чтобы избавиться от селекционных эффектов, связанных с различием глубины обзора для звезд разной металличности и температуры, желательно ограничить выборку расстоянием от Солнца равным 60 пк, в пределах которого ее можно считать полной. Однако принимая во внимание, что максимум на распределении по расстояниям наблюдается на удаленности ≈ 70 пк и ввиду ограниченности количества близких F–

G- звезд для предстоящих статистических исследований, мы посчитали возможным ограничить выборку этим, более далеким расстоянием (при этом объем выборки увеличился примерно на 20 %). В результате ограничения мы одновременно минимизируем ошибки, связанные с исправлением фотометрических индексов от межзвездного покраснения в исходном каталоге, поскольку в этих пределах покраснение незначительно. Кроме того, в этих пределах почти у всех звезд оказываются независимые от фотометрии тригонометрические параллаксы. В окончательно сформированной таким образом выборке осталось 2255 близких звезд тонкого диска.

Для выявления возможных систематических эффектов, вызываемых определением металличностей звезд по данным фотометрии, и исследования зависимости относительных содержаний α -элементов от возраста мы использовали данные сводного каталога однородных спектроскопических определений содержаний железа и магния (Боркова, Марсаков (2005)). В каталоге собраны практически все опубликованные до января 2004 года содержания магния в карликах и субгигантах околосолнечной окрестности, определенные методом синтетического моделирования высокодисперсных спектров. Внутренняя точность приведенных относительных содержаний магния для металличных ($[Fe/H] > -1.0$) звезд составила $\varepsilon_{[Mg/Fe]} = \pm 0.05$, а содержаний железа — $\varepsilon_{[Fe/H]} = \pm 0.07$. Расстояния до звезд и их пространственные скорости вычислены на основе данных из современных массовых высокоточных каталогов. При этом использовались тригонометрические параллаксы с ошибками меньше 25 %, в противном случае использовались фотометрические расстояния, вычисленные на основе $uvby\beta$ -фотометрии. В каталоге изначально присутствует некоторая селекция, искажающая относительные численности звезд разной металличности и температуры (см. Боркова, Марсаков (2005)), в итоге в достаточной степени репрезентативной относительно F–G- карликов тонкого диска можно признать выборку только в пределах 40 пк от Солнца. Тем не менее, чтобы сохранить для исследования достаточное количество звезд со спектроскопически определенным химическим составом, мы решили ограничить данную выборку несколько большим расстоянием (70 пк), поскольку она используется в работе как дополнительная. После применения вероятностного критерия описанного в первой главе и исключения звезд с большими ошибками определения возрастов ($\varepsilon_t > \pm 3$ млрд. лет) в ней осталось всего 220 звезд тонкого диска.

3.3 Анализ эффектов селекции

На Рис. 3.2 а приведена диаграмма «возраст – металличность» для звезд нашей выборки тонкого диска из каталога Holmberg et al. (2009). Небольшое количество звезд выборки с возрастaми более 12 млрд. лет на диаграмму не нанесены, поскольку, как отмечают сами авторы, столь высокие возрастa с большой вероятностью у них получились завышенными. (Звезды выборки со спектроскопическими определениями металличности нанесены на диаграмме открытыми кружками.) Большими открытыми кружками на рисунке нанесены средние значения металличности звезд в десяти узких диапазонах по возрастaу. В каждом диапазоне по 225 звезд. Ошибки определения средних звезд оказались сравнимы с размерами открытых кружков на диаграмме. Плавная кривая представляет собой аппроксимацию всех звезд диаграммы полиномом третьей степени, которая, как видим, вдоль всей абсциссы очень хорошо отслеживает поведение средних точек и как бы сглаживает искомую зависимость металличности от возрастa. Построены также верхняя и нижняя десятипроцентные огибающие.

Для сравнения с независимыми определениями возрастaов на рисунке 3.2 б приведены аналогичные диаграммы для звезд с возрастaми из работ (Feldzing et al. (2001); Rocha-Pinto et al. (2004)). В обеих работах для определения $[Fe/H]$ использовались данные из *uvby β* -фотометрии, однако наш анализ показал, что их величины значительно отличаются от более поздних как спектроскопических, так и фотометрических определений, поэтому мы взяли металличности из Holmberg et al. (2009). Возрастa в первой работе получены по теоретическим изохронам, тогда как во второй — они оценены по хромосферной активности звезд. Поскольку кинематические данные для надежного отождествления звезд тонкого диска в пределах 70 пк от Солнца в этих работах отсутствуют, мы по номерам HD идентифицировали звезды, совпадающие со звездами нашей выборки. В итоге из каталога Feldzing et al. (2001) осталось 1078 звезд, а из выборки (Rocha-Pinto et al. (2004)) — только 206 звезд. Сравнение показывает, что распределения звезд и общий ход зависимостей металличности от возрастa на диаграммах нижней панели в целом не противоречат диаграмме на верхней панели, поэтому в дальнейшем мы будем анализировать последнюю.

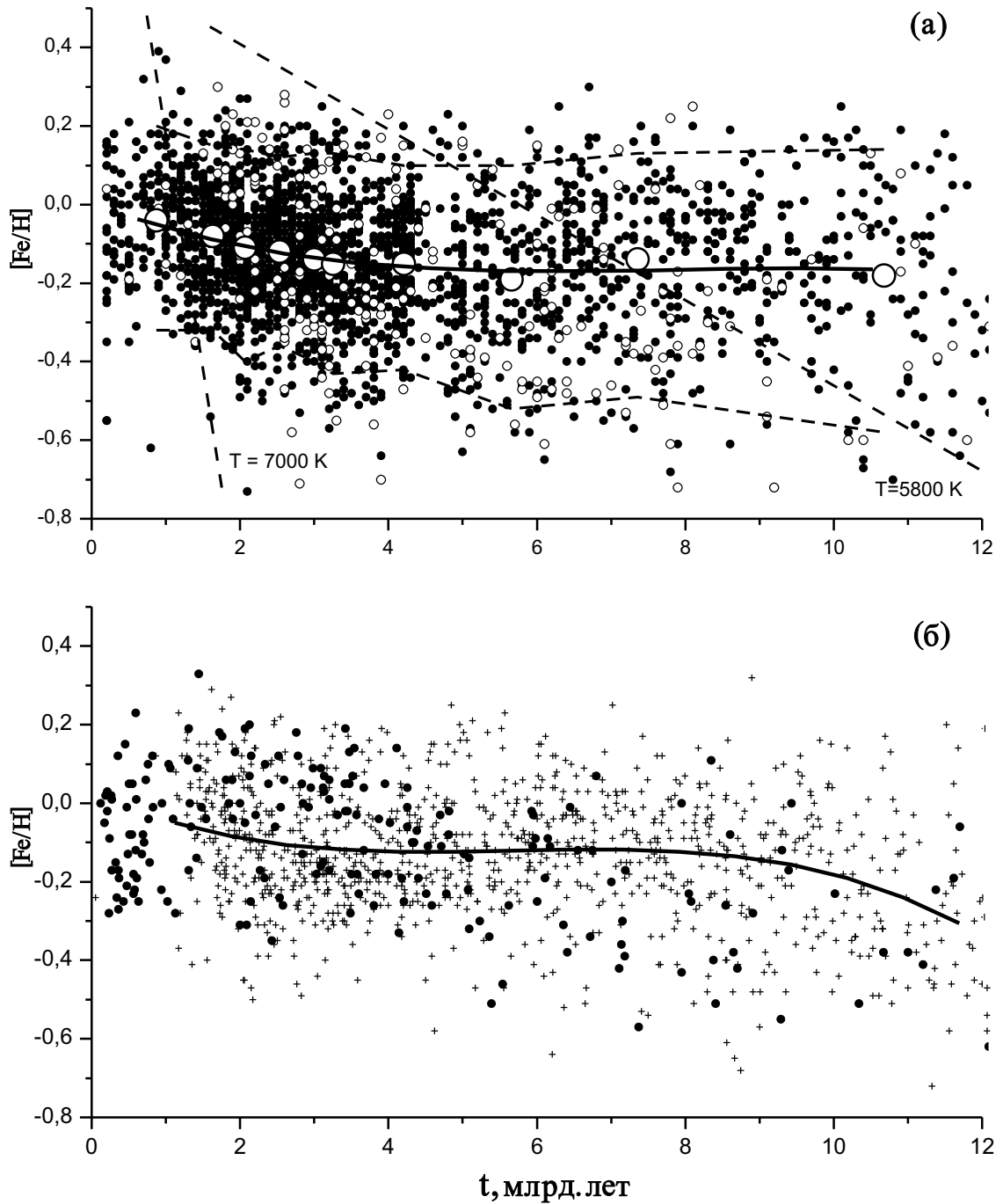


Рис. 3.2: Диаграммы «возраст–металличность» для звезд тонкого диска с $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет, лежащих ближе 70 пк от Солнца из каталога Holmberg et al.(2009)(a) и для тех же звезд с возрастaми из каталогов Feldzing et al. (2001) (крестики) и Rocha-Pinto et al. (2004) (заполненные кружки) (б). Плавные кривые – аппроксимации зависимостей « $[Fe/H]$ –возраст» полиномами третьей степени всех звезд выборок из Holmberg et al.(2009) — (a) и Feldzing et al. (2001) — (б). На панели (a) – большие открытые кружки — средние значения металличности звезд в узких диапазонах по возрастaм; ломаные линии — верхняя и нижняя десятипроцентные огибающие; наклонные штриховые линии — теоретические изотермы для $T_{eff} = 7000$ и 5800 K; малые открытые кружки — звезды со спектроскопическими определениями $[Fe/H]$ из каталога Боркова, Марсаков (2005) и возрастaми из Holmberg et al.(2009). Небольшое количество звезд старше 12 млрд. лет на диаграммы не нанесены.

Итак, из рисунка 3.2 а видно, что наибольший разброс в величинах $[Fe/H]$ наблюдается среди старых звезд галактического диска, тогда как среди молодых звезд он заметно меньше из-за явного дефицита малометаллических звезд (почти пустой левый нижний угол на диаграмме). В работе Nordstrom et al.(2004) это объяснено эффектом ограничения исходного женевско–копенгагенского обзора с высокотемпературной стороны по температурному индексу ($b - y$). При этом, по их мнению, разница в возрастах металлических и малометаллических звезд одинаковой температуры как раз и обеспечивает наблюдаемый наклон нижней огибающей на диаграмме. Эффект ограничения выборки с высокотемпературной стороны действительно несколько искажает реальную диаграмму «возраст – металличность».

На рисунке 3.2 а проведена штриховая наклонная линия, построенная на основе используемых в работе теоретических изохрон, для $T_{eff} = 7000$ К, которая (Holmberg et al.(2009)) соответствует границе, правее которой звезды горячее указанной температуры в выборку не попадают. Эта температура соответствует верхнему температурному пределу нашей выборки. Левее этой линии попадают в основном более холодные звезды, недалеко отошедшие от своей начальной главной последовательности, и небольшое количество массивных звезд, находящихся на стадии субгигантов. В какой-то мере, как видно из диаграммы, высокотемпературное ограничение действительно предполагает небольшой наклон зависимости средней металличности от возраста при возрастах менее ≈ 1.5 млрд. лет. (Выше мы уже отметили, что именно ограничение выборки с низкотемпературной стороны примерно солнечным значением температуры (см. штриховую наклонную линию в правой части диаграммы) и привело к исключению из нее самых старых наиболее металлических звезд из выборки Twarog (1980), обусловившего его вывод о монотонном увеличении металличности с возрастом в дисковой подсистеме Галактики.) Однако, как видно из диаграммы, не эта практически вертикальная линия, правее которой по-прежнему наблюдается дефицит молодых малометаллических звезд, а относительные численности звезд разной металличности при одинаковом возрасте определяют ход зависимости средней металличности от возраста. В частности можно увидеть, что с увеличением температуры плотности звезд на диаграмме в диапазоне $[Fe/H] < -0.1$ начинают резко возрастать на все большем расстоянии от линии $T_{eff} = 7000$ К при уменьшении металличности. Такое могло получиться только из-за существования в тонком диске точек поворота

главной последовательности у звезд поля разной металличности, предполагающих, что в последнее время малометаллических звезд рождается относительно мало. Проверим это предположение.

3.4 Точки поворота ГП у звезд поля разной металличности.

На рисунке 3.3 слева приведены диаграммы « $T_{eff} - M_V$ » для звезд в пределах 70 пк от Солнца в четырех достаточно узких диапазонах по металличности, а справа для тех же диаграмм построены распределения числа звезд в зависимости от температуры. Прямыми отрезками на гистограммах схематически обозначено поведение левых огибающих распределений. (Прогрессивное уменьшение численности звезд на правых крыльях распределений обусловлено, с одной стороны, ограниченной глубиной обзора исходного каталога ($< 8.5^m$), а с другой — селекцией нашей выборки по ошибкам определения возраста (см. рисунок 3.1 в).) Видно, что все малометаллические группы ($[Fe/H] < 0.0$) обнаруживают излом огибающих — перегиб. Правее «точек перегиба» скачком возрастает численность звезд. Обратим внимание, что значения температуры этих точек для всех малометаллических групп находятся далеко от левого края диаграммы. Это означает, что резкий дефицит более горячих (а значит и более молодых) малометаллических звезд связан не с высокотемпературным ограничением выборки, а скорее, с существованием минимального возраста для большинства звезд данной металличности в тонком диске, т. е. с существованием в тонком диске точек поворота главной последовательности у малометаллических звезд поля. На левых графиках рисунка проведены теоретические изохроны согласно данным работы Demarque et al. (2004), проходящие через выделенные на правых панелях «точки перегиба» (для сравнения правее везде нанесены изохроны большего возраста). Для самой металличной группы изохроны не проведены, поскольку «точка перегиба» на ней уверенно не выделяется. По мере возрастания металличности группы, как видно из рисунка, положение точки поворота смещается в сторону более высокой температуры (более молодого возраста), оставаясь для звезд с ($[Fe/H] < 0.0$) внутри исследуемого температурного диапазона. Небольшое количество более горячих, чем точка поворота, звезд скорее всего являются «голубыми беглецами» и звездами, рождающимися в небольших количествах после образования в галактическом диске основной массы звезд данной металличности.

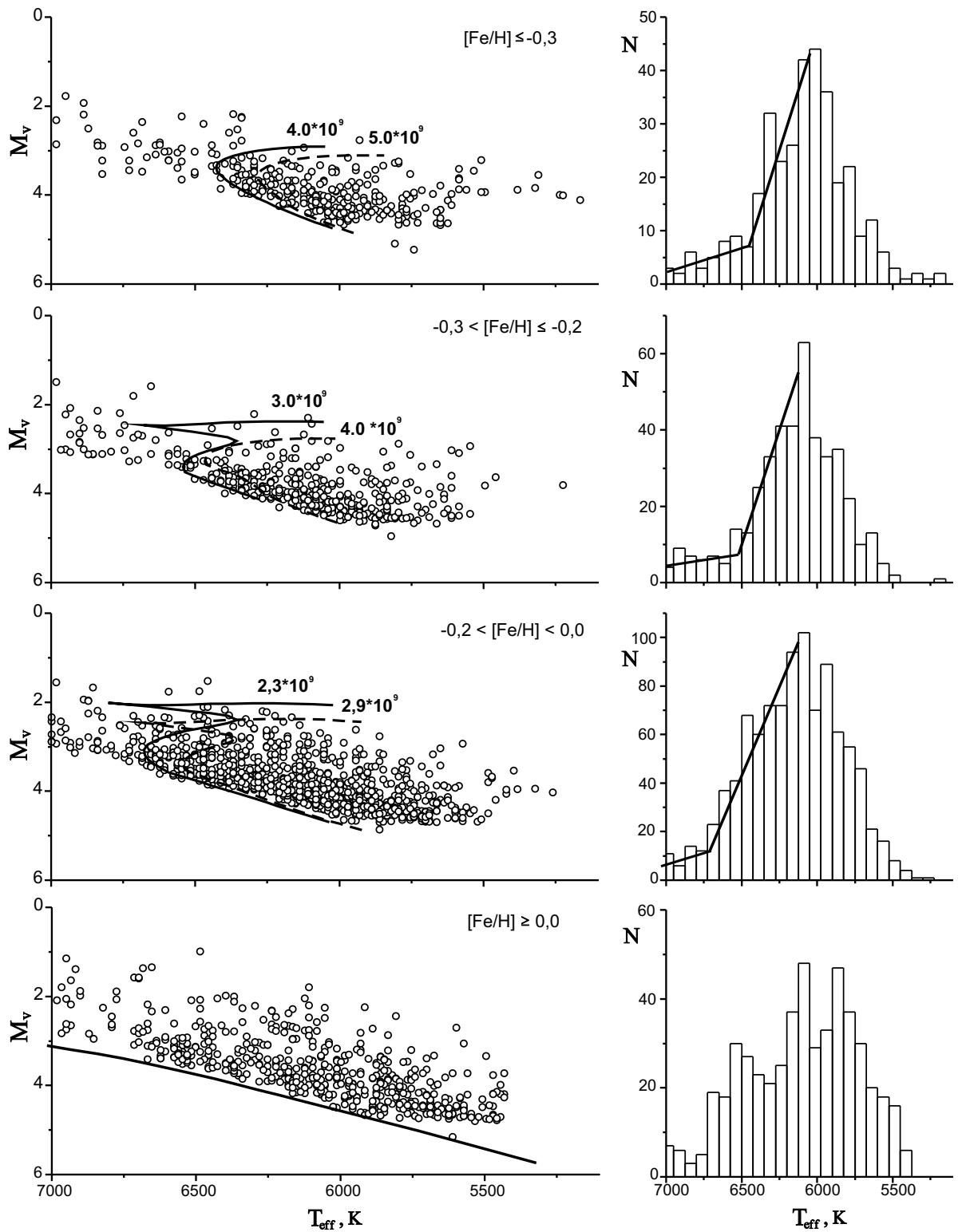


Рис. 3.3: Диаграммы « $T_{eff} - M_v$ » для звезд в пределах 70 пк от Солнца в четырех узких диапазонах по металличности (слева) и распределения числа звезд в зависимости от температуры для тех же диаграмм (справа). Прямые отрезки на гистограммах подчеркивают положения резких изломов на их высокотемпературных участках. На трех левых панелях нанесены теоретические изохроны из работы Demarque et al. (2004) с точками поворота, соответствующим положениям изломов на гистограммах (правее их для сравнения нанесены изохроны большего возраста). Цифрами указаны возрасты изохрон.

3.5 Существуют ли старые металличные звезды?

Несмотря на то, что положение довольно большого количества звезд с солнечной металличностью на диаграмме Герцшпрунга–Рессела согласно теоретическим изохронам указывает на их большие возрасты, в работе Pont, Eyser (2004) существование старых металличных звезд подвергается сомнению. Ее авторы пришли к такому заключению после обнаружения того факта, что спектроскопические данные в выборке Edvardsson et al. (1993) у большинства богатых металлами звезд старше 5 млрд. лет обнаруживают заметные расхождения с одним из следующих параметров: тригонометрическим расстоянием, фотометрической температурой, фотометрической металличностью или изохронным возрастом из Nordstrom et al. (2004). Эти ошибки, по их мнению, привели к необоснованному завышению возрастов звезд, попадающих в области повышенной плотности изохрон, и значит само существование старых металличных звезд является артефактом.

Однако, как видно из рисунка 3.2, наша выборка звезд тонкого диска со спектроскопическими определениями содержания железа и исправленными определениями возрастов звезд женевско–копенгагенского обзора из работы Holmberg et al. (2009) также демонстрирует большое количество таких звезд. Правда некоторое занижение металличности в каталоге Holmberg et al. (2009) у самых богатых звезд, наблюдаемое на рисунке 3.1 а, действительно может свидетельствовать об избирательном завышении возрастов у наиболее старых богатых металлами звезд. Для проверки этого момента на рисунке открытыми кружками выделены звезды старше 5 млрд. лет. Видно, что большинство старых звезд лежит ниже диагональной линии, то есть у них у всех независимо от металличности значения $[Fe/H]$ занижены (правда в пределах ошибок). Подобное искажение приводит лишь к небольшому систематическому завышению возрастов старых звезд любой металличности. Анализ показал, что учет наблюдаемых на рисунках 3.1 а,б отклонений в величинах металличностей и эффективных температур между их спектроскопическими и фотометрическими значениями не в состоянии заметно изменить относительное количество звезд в правом верхнем углу диаграммы «возраст – металличность». Хромосферные возрасты звезд из работы Rocha-Pinto et al. (2004) на рисунке 3.2 б также демонстрируют некоторый процент таких звезд. Другими словами, независимые спектроскопические определения параметров атмосфер, содержаний железа и возрас-

Таблица 3.1: Кинематические параметры четырех групп близких звезд тонкого диска

Параметр	$t < 2$ млрд. лет		$t > 5$ млрд. лет	
	$[Fe/H] > 0.0$	$[Fe/H] < -0.3$	$[Fe/H] > 0.0$	$[Fe/H] < -0.3$
$\langle V_{LSR} \rangle, \text{ км с}^{-1}$	26 ± 1	32 ± 2	44 ± 2	48 ± 2
$\sigma_V, \text{ км с}^{-1}$	11 ± 1	10 ± 2	19 ± 2	21 ± 2
N	197	33	133	159

тов подтверждают существование в тонком диске вблизи Солнца значительного количества старых металлических звезд.

К искажению возрастов звезд может привести также эффект их неразрешенной двойственности. Действительно, светимости неразрешенных тесных двойных звезд, вычисленные из тригонометрических параллаксов, получаются больше истинных Suchkov (2000). В итоге и возрасты звезд еще не дошедших до своей точки поворота будут получаться завышенными, тогда как выше ее при одинаковой температуре располагаются все более молодые звезды. Как показал анализ, среди звезд еще не прошедших свою точку поворота этот эффект проявляется, но находится в пределах 2 млрд. лет, то есть меньше верхнего ограничения ошибки возраста, принятого в настоящей работе. Тем не менее, мы выделили в своей выборке кандидатов в двойные звезды согласно критерию, предложенному в работе Grenon (1972). Таковых оказалось около 20 %, но диаграмма «возраст – металличность», построенная для оставшихся одиночных звезд, продемонстрировала, что ее характер практически не изменился, поэтому здесь мы ее не приводим. Дополнительно проверить, не являются ли все металлические звезды на самом деле молодыми, можно по независимому статистическому индикатору возраста – кинематике. Для этого сравним распределения по скоростям относительно локального стандарта покоя металлических ($[Fe/H] > 0.0$) и малометаллических ($[Fe/H] < -0.3$) звезд тонкого диска нашей выборки из Holmberg et al.(2009), предварительно выделив среди них очень молодые ($t < 2$ млрд. лет) и очень старые ($t > 5$ млрд. лет) звезды. В таблице 3.1 приведены соответствующие данные. Сравнение показывает, что параметры распределений скоростей звезд одинакового возраста, но разной металличности, очень похожи. При этом старые звезды демонстрируют в полтора-два раза большие по величине и средние значения и дисперсии остаточных скоростей, чем молодые звезды. Такое поведение позволяет утверждать, что обсуждаемые металлические звезды действительно близки по возрасту к старым малометаллическим звездам диска. Поэтому необходимо проверить, не мигрировали

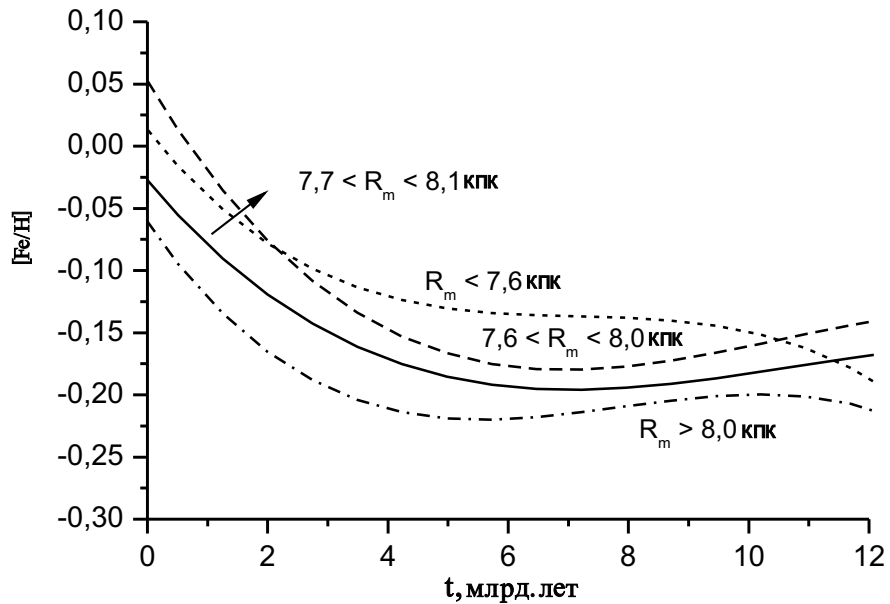


Рис. 3.4: Аппроксимационные зависимости «металличность–возраст» для звезд тонкого диска, расположенных ближе 70 пк от Солнца и со средними радиусами орбит $R_m < 7.6$ кпк, $7.6 < R_m < 8.0$ кпк, $7.9 < R_m < 8.1$ кпк и $R_m > 8.0$ кпк. Налицо дрейф положения зависимости при увеличении среднего радиуса орбиты при сохранении общего вида трендов.

ли старые богатые металлами звезды из более близких к галактическому центру расстояний, где металличность выше.

3.6 Влияние радиальной миграции звезд на связь между возрастом и металличностью

В работах (Roskar et al. (2009)) теоретически, и автором (Haywood (2006), Haywood (2008)) на примере близких к Солнцу звезд доказывается, что именно совместное действие радиальной миграции звезд, обусловленной эффектами релаксации, и отрицательного радиального градиента металличности в галактическом диске приводит к наблюдаемой у близких звезд большой дисперсии металличности, которая, в свою очередь, замывает возможно существующую в нем зависимость между металличностью и возрастом.

Действительно, согласно современным представлениям, звезды, рождаясь из межзвездной среды, движущейся по круговым орбитам, со временем увеличивают эксцентриситет своей орбиты в результате взаимодействия с возмущениями гравитационного потенциала Галактики. Однако средние радиусы их орбит остаются при этом, как полагают, практически неизменными, отражая галактоцентрические расстоя-

ния мест их рождения (Edvardsson et al. (1993); Grenon (1972)). Поэтому Grenon (1972), объясняя сравнительно высокие эксцентриситеты орбит сверхметаллических ($[Fe/H] > 0.2$) звезд, предположил, что они мигрировали к Солнцу из более близких к галактическому центру расстояний. Понятно, что такие звезды должны быть достаточно старыми, чтобы успеть существенно увеличить эксцентриситет и апогалактический радиус своей орбиты. Одновременно полагается, что менее металлические и в настоящий момент близкие к нам звезды наоборот, рождены на больших галактоцентрических расстояниях, где скорость звездообразования ниже. Посмотрим, как будут выглядеть подобные диаграммы у звезд с разными средними радиусами орбит.

3.7 Зависимости между металличностью и возрастом для звезд тонкого диска, рожденных на разных галактоцентрических расстояниях.

Чтобы иметь возможность лучше разглядеть различия между последовательностями «возраст – металличность» звезд с разными R_m , на рисунке 3.4 приведены лишь аппроксимации соответствующих диаграмм полиномами третьей степени. (Полиномы в данном случае оказываются предпочтительнее средних точек, построенных на рисунке 3.2 поскольку они лучше отслеживают положения средних зависимостей при малом числе звезд в выборке и не подвержены случайным выбросам, тогда как при достаточной статистике полином и линия, соединяющая средние точки, практически совпадают.) Предварительно для этого звезды нашей выборки тонкого диска в пределах 70 пк от Солнца мы разделили сначала на две группы значением среднего радиуса орбиты больше и меньше солнечного. А затем вторую группу (которая получилась более чем в два раза большей численности) — еще на две примерно равные по объему значением $R_m = 7.6$ кпк (заметим, что именно при этом значении наблюдается максимум на распределении звезд диска по R_m). Кроме того мы выделили еще группу с примерно солнечными радиусами орбит ($7.9 < R_m < 8.1$ кпк).

Из рисунка видно, что зависимости «возраст–металличность» у всех групп получились в пределах неопределенностей похожими, но с увеличением среднего радиуса орбиты происходит дрейф их положений, причем неравномерный — последовательности обеих групп звезд с радиусами орбит меньше солнечного оказались выше, тогда как между собой они

весьма близки и даже пересекаются. Такое поведение последовательностей можно объяснить тем, что с увеличением разницы между средними радиусами орбит и солнечным галактоцентрическим расстоянием в окрестности Солнца попадают звезды с все большими эксцентриситетами, среди которых начинает все больше увеличиваться доля более старых и одновременно менее металлических звезд. При этом в области $R_m < R$ в тонком диске действуют два противоположно действующих эффекта — отрицательный радиальный градиент металличности и уменьшение металличности звезд с увеличением возраста (по крайней мере, последние несколько миллиардов лет, о чем подробнее см. ниже), тогда как в области $R_m > R$ оба эффекта складываются. (В итоге на диаграмме «средний радиус орбиты – металличность» у звезд диска наблюдается излом, который и обсуждается в работах (Rocha-Pinto et al. (2006); Шевелев, Марсаков (1995)).)

3.8 Диаграмма «возраст–металличность» для звезд, рожденных вблизи солнечного круга.

На Рис. 3.5 приведена диаграмма «возраст – металличность» для звезд тонкого диска, находящихся в пределах 70 пк от Солнца и имеющих средние радиусы орбит в диапазоне $7.7 < R_m < 8.4$ кпк. При определении размеров диапазона мы руководствовались следующим.

Во-первых, в его пределах изменение величины $[Fe/H]$ из-за радиального градиента металличности должно быть существенно меньше ошибок определения этой величины. Действительно, при обычно принимаемой величине $grad_{R_m}[Fe/H] \approx -0.1$ (см., Марсаков, Боркова (2006)), различие металличности на краях выбранного диапазона оказывается меньше заявленной в каталоге Holmberg et al. (2009) ошибки определения металличности. Во-вторых, с целью получения как можно большей по объему выборки, мы старались возможно ближе приблизиться к максимуму на распределении звезд нашей начальной выборки по среднему радиусу орбит, который наблюдается при $R_m \approx 7.60$ кпк. В сторону увеличения R_m мы продлили диапазон несколько дальше, чтобы немного уравновесить численности звезд с большими и малыми радиусами орбит, поскольку от максимума в обе стороны численности звезд монотонно уменьшаются. На рисунке 3.5, так же как и на рисунке 3.2, нанесены средние значения металличности в узких диапазонах по возрасту и аппроксимация диаграммы полиномом третьей степени. Из сравнения рисунков можно

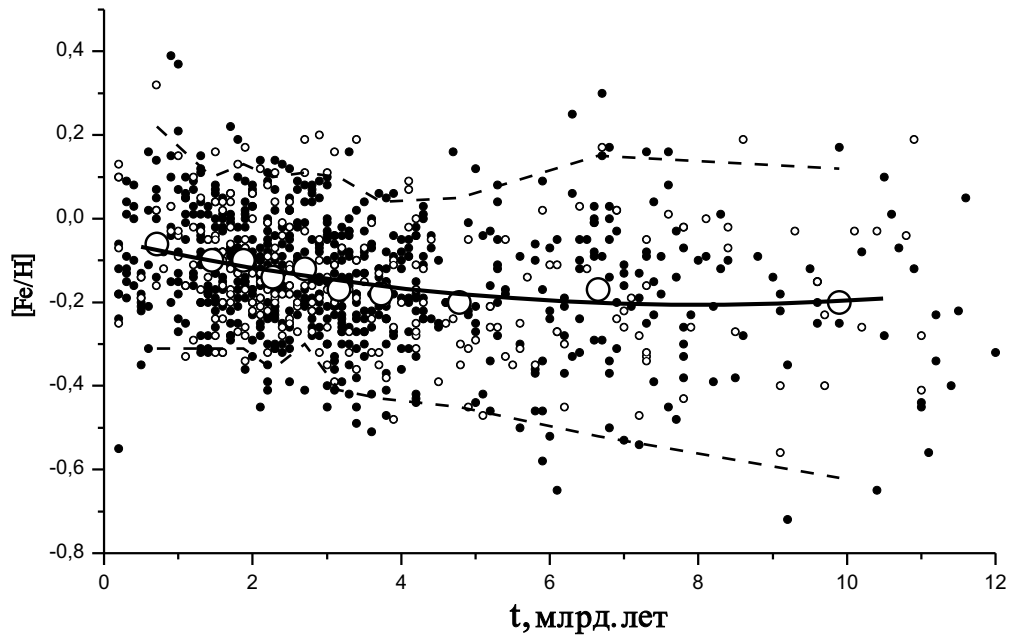


Рис. 3.5: Диаграмма «возраст – металличность» для звезд тонкого диска, расположенных ближе 70 пк от Солнца и со средними радиусами орбит $7.7 < R_m < 8.4$ кпк. Обозначения как на рис. 3.2 а; малые открытые кружки — звезды со средними радиусами орбит $7.9 < R_m < 8.1$ кпк.

увидеть, что зависимость металличности от возраста осталась практически неизменной, не уменьшился и разброс металличности у звезд одинакового возраста. В итоге ни старые металличные ($[Fe/H] > 0.0$), ни сравнительно молодые малометаллические ($[Fe/H] < -0.3$) звезды из выборки полностью не исчезли. Малыми открытыми кружками на рисунке 3.5 выделены звезды из предельно узкого диапазона $7.9 < R_m < 8.1$ кпк, которые демонстрируют, что на любом участке диаграммы количество звезд уменьшается примерно пропорционально их начальной численности. При этом поведение средней зависимости (плавная кривая на рисунке 3.5, см. также рисунок 3.4) практически не зависит от ширины диапазона по R_m . В частности, для звезд старше 5 млрд. лет и у полной выборки звезд в пределах 70 пк от Солнца и для подвыборки из нее звезд с $7.9 < R_m < 8.1$ кпк, средние значения и дисперсии металличности практически совпадают, хотя численности звезд в выборках отличаются более чем на порядок. Другими словами получается, что при любом возрасте у звезд, даже рожденных на солнечном галактоцентрическом расстоянии, наблюдается разброс металличности за пределами ошибок ее определения, но средняя металличность последние примерно 5 млрд. лет все же меняется с возрастом. Верхняя и нижняя огибающие на диаграмме также демонстрируют увеличение металличности при приближении к на-

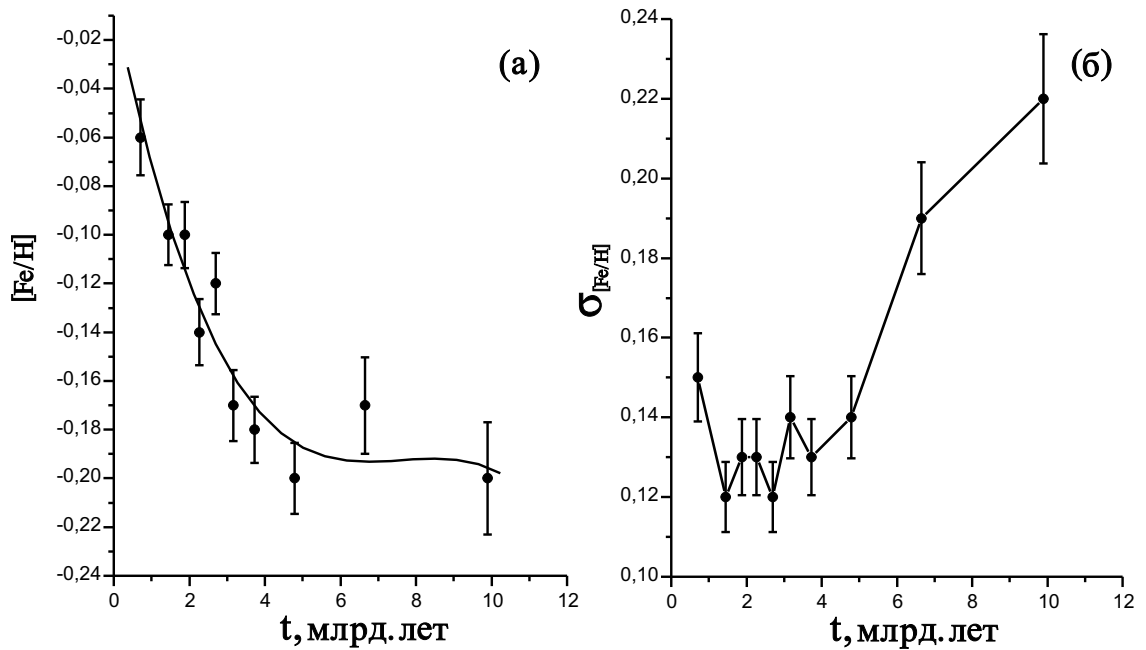


Рис. 3.6: Зависимости среднего значения (а) и дисперсии металличности (б) от возраста для звезд тонкого диска в пределах 70 пк от Солнца и со средними радиусами орбит $7.7 < R_m < 8.4$ кпк. Бары — ошибки определения соответствующих величин. Кривая линия на панели (а) — аппроксимация точек полиномом третьей степени.

стоящему времени. Обратим внимание на одно немаловажное свойство распределения звезд диска по возрастам, хорошо видимое на диаграмме «возраст – металличность», это резкое увеличение плотности звезд любой металличности при переходе через значение 4.5 млрд. лет в сторону меньших возрастов. (Заметим, что отмеченное выше искажение возрастов в окрестности 3 – 5 млрд. лет вполне может несколько сместить наблюдаемую границу резкого увеличения количества звезд.) На преимущественные значения возрастов < 5 млрд. лет у звезд тонкого диска ранее уже отмечалось (см., в частности, Holmberg et al.(2009); Haywood (2008); Reddy et al. (2006)).

3.9 Зависимости «возраст – металличность» и «возраст – относительное содержание магния»

Итак, мы видим, что ни один из обсужденных эффектов не в состоянии существенно исказить общий вид диаграммы «возраст – металличность» на рисунке 3.6 а для выборки F–G- звезд подсистемы тонкого диска в пределах 70 пк от Солнца. Проследим, тем не менее, поведение зависимостей среднего значения и дисперсии металличности от возраста, построенные

на основе данных для выборки из диапазона $7.7 < R_m < 8.4$ кпк. Из рисунка 3.6 а, где соответствующие величины вычислялись в десяти узких бинах по возрасту, можно увидеть, что вначале средняя металличность звезд тонкого диска, родившихся на солнечном галактоцентрическом расстоянии, заметно уменьшается с увеличением возраста, а после 4 – 5 млрд. лет остается в пределах ошибок постоянной и равной $\langle [Fe/H] \rangle \approx -0.19$. Дисперсия же металличности, как видно из рисунка 3.6 б, вначале практически не зависит от возраста и равна 0.13, однако после 4 – 5 млрд. лет она начинает быстро увеличиваться и для самых старых звезд достигает величины 0.22.

Фотометрические металличности у некоторых звезд могут быть искажены неучтенными систематическими эффектами, поэтому необходимо исследовать зависимость «возраст – металличность» и по звездам каталога со спектроскопическими определениями $[Fe/H]_{sp}$. Соответствующая диаграмма для звезд в пределах 70 пк от Солнца приведена на рисунке 3.7 а. Напомним, что возрасты для этих звезд взяты из каталога Holmberg et al.(2009), где они определены с несколько отличающимися от спектроскопических значениями металличности, однако различия, как видно из рисунка 3.1 а, находятся в пределах заявленных в обоих каталогах ошибок. Заметим, что в этой выборке заведомо отсутствуют неразрешенные двойные звезды — в противном случае они с большой вероятностью были бы известны как спектрально двойные. Поскольку численность звезд тонкого диска в каталоге невелика, мы не стали ограничивать выборку по средним радиусам орбит, тем более что это ограничение, как было продемонстрировано выше, практически не влияет на характер выявляемой зависимости средней металличности от возраста. При сравнении положений звезд на рисунке 3.5 а и рисунке 3.7 а следует принять во внимание селекцию в выборке звезд со спектроскопическими металличностями, заключающуюся в том, что в ней глубина обзора заметно увеличивается с уменьшением металличности (Марсаков, Боркова (2005)). Это привело к тому, что по данным последней выборки средняя металличность в тонком диске при возрасте $t > 4$ млрд. лет оказалась несколько ниже, чем по данным репрезентативной выборки звезд диска из каталога Holmberg et al.(2009). При этом в целом звезды обеих выборок на диаграмме «возраст – металличность» оккупируют одинаковую площадь (см. рисунок 3.2 а). (Как выше уже отмечалось, сказанное остается справедливым и при независимых определениях возрастов (см. рисунок 3.2 б).) Из рисунка 3.7 а видно, что как и в случае значительно большей по объ-

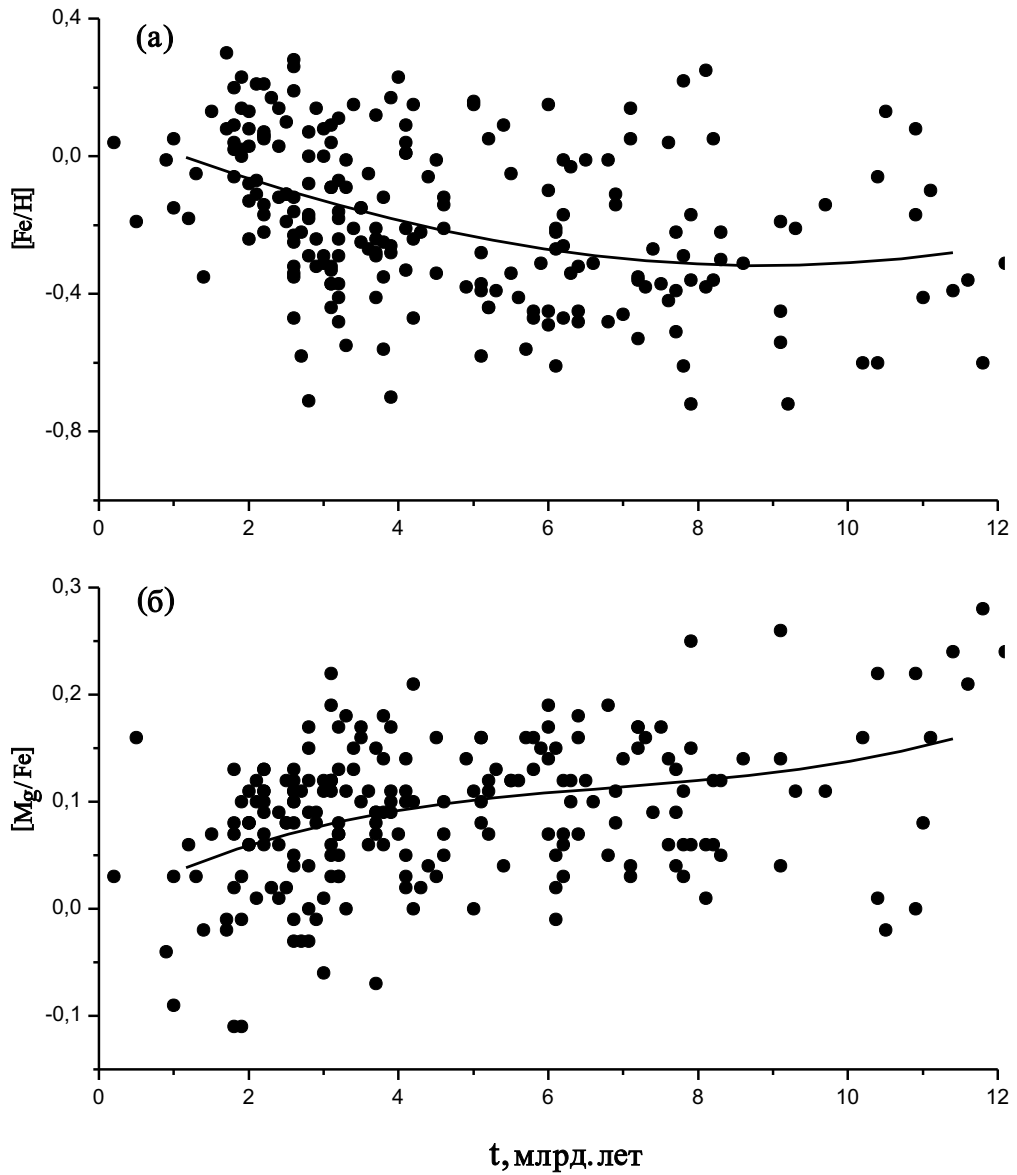


Рис. 3.7: Диаграммы «возраст– $[Fe/H]$ » (а) и «возраст– $[Mg/Fe]$ » (б) для звезд тонкого диска со спектроскопически определенными содержаниями железа и магния из каталога Боркова, Марсаков (2005), лежащих ближе 70 пк от Солнца и с ошибками определения возраста с $\varepsilon_t < \pm 3$ млрд. лет. Плавные кривые — аппроксимации диаграмм полиномами третьей степени.

ему выборки, средние значения $\langle [Fe/H]_{sp} \rangle$ систематически уменьшаются с увеличением возраста, но при возрастах более 4 – 5 млрд. лет в пределах ошибок они остаются неизменными. Таким образом, мы можем заключить, что детали, отражающие относительные металличности звезд разного возраста, на спектроскопических и фотометрических зависимостях «возраст – металличность» в пределах неопределенностей совпадают.

Для понимания причины столь сложного поведения зависимости «воз-

раст – металличность» важно проследить и зависимость относительного содержания магния (представителя α -элементов) от возраста среди звезд диска. Напомним, что согласно современным представлениям α -элементы вместе с небольшим количеством атомов железа выбрасываются сверхновыми второго типа, время эволюции которых до вспышки порядка 10 млн. лет. С другой стороны, основное количество атомов элементов железного пика производится в момент вспышек сверхновых типа Ia, происходящих через характерное время ≈ 1 млрд. лет (см., например, Matteucci (2001), Tsujimoto et al. (1995)) после образования их звезд-предшественниц. Поэтому в звездно-газовой системе после внезапно ускорившегося звездообразования относительное содержание α -элементов во вскоре родившихся звездах может вначале даже несколько увеличиться, зато примерно через миллиард лет оно должно систематически уменьшаться из-за наступления эры массовых вспышек сверхновых типа Ia. Диаграмма для звезд тонкого диска в пределах 70 пк от Солнца «возраст – относительное содержание магния» по данным нашего каталога со спектроскопическими определениями содержания этого элемента приведена на рисунке 3.7б. Из рисунка видно, что в середине этой зависимости действительно наблюдается перегиб. (Хотя из-за малого числа точек вероятность ошибочно отвергнуть гипотезу об описании зависимости прямой регрессией против альтернативы описания ее полиномом третьей степени довольно высока, но о существовании перегиба свидетельствует значимая разница между средними отношениями $\langle [Mg/Fe] \rangle$ для звезд моложе 2 млрд. лет ($\langle [Mg/Fe] \rangle = 0.04 \pm 0.01$) и старше 4 млрд. лет ($\langle [Mg/Fe] \rangle = 0.11 \pm 0.01$). В итоге, среднее относительное содержание магния в звездах тонкого диска, будучи на начальных этапах его формирования довольно высоким ($\langle [Mg/Fe] \rangle \approx 0.10$) и в пределах ошибок независимым от возраста, несколько миллиардов лет назад стало заметно быстрее уменьшаться при приближении к настоящему времени. К сожалению, недостаточное количество звезд со спектроскопическими определениями относительного содержания магния и большие неопределенности в определении возраста не дают возможность в деталях проследить поведение этого содержания в зависимости от возраста и статистически уверенно обозначить момент начала более быстрого уменьшения отношения $\langle [Mg/Fe] \rangle$. Однако из сравнения диаграмм «возраст – металличность» и «возраст – относительное содержание магния» можно увидеть, что уменьшение среднего относительного содержания магния в звездах тонкого диска началось, похоже, все-таки несколько позже (при-

близительно 3 – 4 млрд. лет назад), чем увеличение средней металличности. Наблюдаемое уменьшение отношения $[Mg/Fe]$ вплоть до настоящего момента свидетельствует, что в подсистеме после внезапной вспышки звездообразования скорость ее затем несколько уменьшилась, но всегда оставалась все же больше, чем была до вспышки.

3.10 Итоги третьей главы

Итак, если полагать, что средние радиусы орбит звезд действительно отражают галактоцентрические расстояния их мест рождения, то обе рассмотренные диаграммы «возраст – $[Fe/H]$ » и «возраст – $[Mg/Fe]$ », свидетельствуют, что в первые несколько миллиардов лет формирования подсистемы тонкого диска межзвездное вещество в нем было, в среднем, довольно богато тяжелыми элементами ($\langle [Fe/H] \rangle \approx -0.2$), а среднее относительное содержание магния было лишь незначительно больше солнечного ($\langle [Mg/Fe] \rangle \approx 0.1$). Дисперсии содержаний тяжелых элементов при этом были довольно велики. Причинами постоянства все это время среднего содержания тяжелых элементов и большой его дисперсии во вновь рождающихся звездах явились, скорее всего, низкая скорость звездообразования, с одной стороны, и непрерывное падение на диск малометаллического межзвездного вещества из внешних частей Галактики, с другой. Однако, примерно 4 – 5 млрд. лет назад средняя металличность стала систематически увеличиваться, а чуть позже среднее относительное содержание магния – уменьшаться. Произошло это, вероятно, из-за внезапного увеличения скорости звездообразования в тонком диске, что подтверждает и существенное увеличение численности звезд, начиная примерно с этого же возраста. В результате непрерывного перемешивания межзвездной среды высокая дисперсия металличности на момент образования первых звезд тонкого диска ($\sigma_{[FeH]} \approx 0.22$) систематически уменьшалась первые несколько миллиардов лет формирования подсистемы, но 4 – 5 млрд. лет назад начавшееся звездообразование остановило этот процесс, и в дальнейшем дисперсия металличности оставалась неизменной ($\sigma_{[FeH]} \approx 0.13$) вплоть до настоящего времени. В этой картине существование богатых металлами старых звезд, как и высокую среднюю металличность у звезд на ранних этапах образования подсистемы тонкого диска можно объяснить тем, что в сильно неоднородной по содержанию металлов межзвездной среде звездообразование более интенсивно идет в облаках с повышенным содержанием тяжелых элементов. Одно-

временно это свидетельствует о том, что основное обогащение металлами в Галактике произошло на предшествующих стадиях ее эволюции, а на стадии тонкого диска оно было небольшим и наблюдалось только последние 4 – 5 млрд. лет. Данная картина в целом отличается от всех предложенных ранее (см. введение), хотя все ее детали по отдельности и отмечались в разных работах. Предпочтительность предлагаемой модели обуславливается тем, что диаграмма «возраст – металличность» здесь впервые построена, во-первых, по практически генеральной совокупности одиночных F–G- карликов, находящихся в пределах 70 пк от Солнца. Во-вторых, в выборке минимизировано количество звезд, принадлежащих подсистеме толстого диска. И, наконец, в-третьих, результаты выверены по звездам, рожденным на солнечном галактоцентрическом расстоянии. К сожалению, недостаточная глубина Женевско–копенгагенского обзора и недостаточно надежные определения возрастов в диапазоне 3–5 млрд. лет не позволили сделать достаточно объемную выборку с тем, чтобы отследить моменты начала резкого увеличения скорости звездообразования на разных расстояниях от центра Галактики.

Глава 4

Свойства населения классических цефеид в Галактике

4.1 Введение

Благодаря тому, что по легко определяемым из наблюдений периодам переменности цефеид можно вычислить их массы, светимости и возрасты, эти звезды занимают одну из ведущих ролей в исследовании нашей и других галактик. Цефеиды находятся на такой стадии эволюции, когда ядерные реакции, происходящие внутри них, частично искажают первичный химический состав их атмосфер из-за неполного протекания CNO цикла. Это происходит у цефеид, которые пересекают полосу неустойчивости не в первый раз, но к сожалению, большинство из известных цефеид наблюдаются именно на таких стадиях. Однако подробный анализ содержаний различных элементов в их атмосферах позволил выявить степень этих изменений для различных элементов (см., например, Kovtyukh et al. (2005)). Поскольку классические долгопериодические цефеиды — это продвинувшиеся в своей эволюции массивные В-звезды, они весьма молоды и их возраст находится в пределах $\approx (20 - 200)$ млн. лет, поэтому по ним удобно отслеживать степень неоднородности химического состава внутри областей недавнего звездообразования нашей Галактики (Lepin et al. (2011); Гожа и др. (2013)). Небольшой возраст классических цефеид позволяет с гарантией причислять их к типичным представителям подсистемы тонкого диска Галактики, поэтому по цефеидам изучают спиральную структуру в нашей и других галактиках. Именно по этим звездам удалось надежно проследить уменьшение металличности с удалением от галактического центра и доказать, что радиальный градиент металличности в тонком диске, полагавшийся обычно линейным, на самом деле имеет сложную структуру, которую связывают с коротаци-

онными эффектами (Luck et al.(2011); Acharova et al. (2012)). Однако в опубликованных каталогах для некоторых цефеид приводятся довольно высокие пространственные скорости, не характерные для тонкого галактического диска, а также аномальные относительные содержания некоторых химических элементов. Поэтому представляется интересным проанализировать все эти отклонения с учетом ошибок определения соответствующих параметров в каждой звезде.

К настоящему времени накопилось достаточное количество точных астрометрических и спектроскопических данных для того, чтобы провести комплексные статистические исследования химических и кинематических свойств классических цефеид в нашей Галактике с целью проверки степени однородности этого населения. Глобальной же целью подобных исследований является детализация истории звездообразования в тонком галактическом диске.

4.2 Исходные данные

Пространственное положение, кинематические данные и периоды для 276 классических цефеид были взяты из каталога Verdnikov et al. (2003). В этом каталоге использованы точные экваториальные координаты цефеид из каталога HIPPARCOS, величины собственных движений из каталога TYCHO-2, лучевые скорости из литературы, а расстояния определены на основе полученных авторами периодов переменности. По этим данным вычислили прямоугольные координаты x , y , z , (направленные к галактическому центру, в сторону вращения и к северному полюсу соответственно), полные остаточные скорости относительно локального центроида V_{LSR} , а также компоненты V_R , V_Θ , V_Z пространственных скоростей в цилиндрических координатах, исправленных за движение Солнца относительно локального центроида. Здесь компонента V_R направлена на антицентр Галактики, V_Θ – в сторону галактического вращения, а V_Z – к северному полюсу Галактики. Компоненты остаточной скорости Солнца относительно локального центроида приняты равными $(u, v, w)_\odot = (11.1, 12.24, 7.25) \text{ км с}^{-1}$ (Schonrich et al.(2010)), солнечное галактоцентрическое расстояние – 8.0 кпк, а скорость вращения локального центроида (Local Standard of Rest) – 220 км с^{-1} . Ошибки определения расстояний от Солнца до цефеид в основном возникают из-за неопределенностей в избытках цвета цефеид и различия в разных направлениях закона межзвездного поглощения. Кроме того, у некоторых цефеид неуверенно

определяются моды пульсаций, что может приводить к систематическим занижением их расстояний на $\sim 25\%$. Тем не менее, авторами каталога декларируется средняя величина ошибки расстояний $\sim 10\%$. Ошибки пространственных скоростей напрямую зависят от расстояния до цефеид, но сами ошибки расстояний играют при этом не главную роль, особенно для $d > 1$ кпк. В каталоге Verdnikov et al. (2003) приведены ошибки собственных движений, на основе которых мы вычислили абсолютные ошибки тангенциальных скоростей (т.е. скоростей, лежащих в картинной плоскости) цефеид — именно они дают подавляющий вклад в полную ошибку пространственной скорости. (Вклад в полную скорость индивидуальных ошибок расстояний и лучевых скоростей цефеид мы не учитывали потому, что они много меньше и в исходном каталоге не персонифицированы.) Заметим, что ошибки тангенциальных скоростей у большинства цефеид превышают поправки, обусловленные дифференциальным вращением Галактики. Кроме того, многие цефеиды нашей выборки лежат далее 2 кпк от Солнца, где величины этих поправок весьма неопределенны и зависят от принятой модели вращения Галактики. Поскольку в данной работе оценивается лишь степень кинематической однородности населений классических цефеид в нашей Галактике, мы эти поправки не учитывали. На рисунке 4.1 а приведено распределение ошибок тангенциальных скоростей цефеид каталога (εV_t). Наиболее вероятная ошибка, как видим, примерно 3 км с^{-1} и при ее увеличении численность на гистограмме экспоненциально уменьшается. Но примерно 20% цефеид каталога имеют ошибки, превышающие 40 км с^{-1} . Для удобства анализа мы составили несколько подвыборок цефеид с ошибками скоростей менее 5, 10, 20 и 40 км с^{-1} . На рисунке 4.1 б приведена диаграмма «расстояние от Солнца – остаточная скорость», где разными значками обозначены цефеиды с разной точностью определения скоростей. Из диаграммы видно, что скорости некоторых цефеид каталога явно сильно завышены случайными ошибками. Поскольку остаточные скорости мы не исправляли за дифференциальное вращение Галактики, на диаграмме наблюдается положительный тренд, т.е. на далеких расстояниях мы не видим звезд с малыми остаточными скоростями. Видно также, что все звезды с ошибками определения скоростей $< 5 \text{ км с}^{-1}$ находятся в пределах ~ 1 кпк, с ошибками $< 10 \text{ км с}^{-1}$ — в пределах ~ 1.5 кпк, $< 20 \text{ км с}^{-1}$ — в пределах ~ 5 кпк, а с ошибками $< 40 \text{ км с}^{-1}$ — в пределах ~ 3.5 кпк. При этом автоматически исключаются звезды с очень высокими скоростями. Тем не менее, даже в пределах 1 кпк некоторые цефеиды демонстрируют доволь-

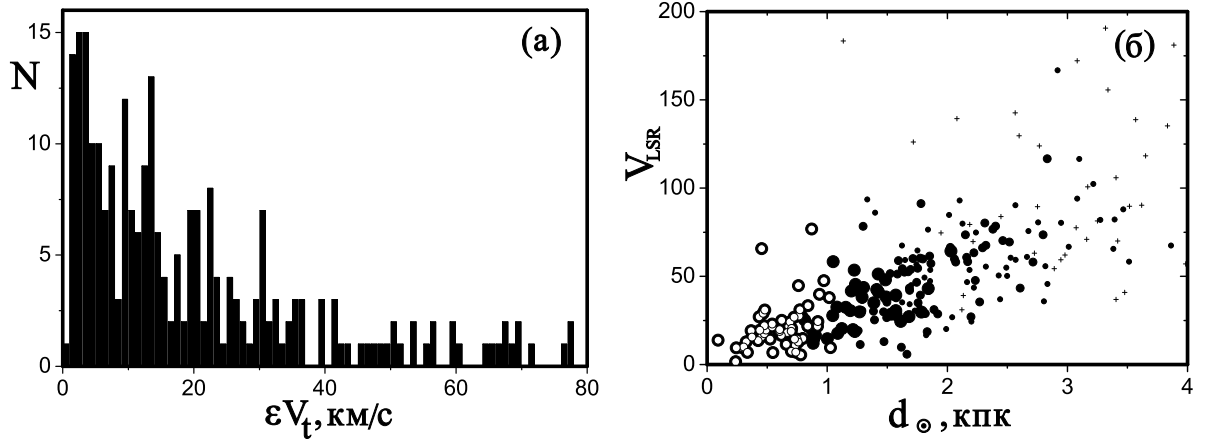


Рис. 4.1: Распределение ошибок определения тангенциальных скоростей цефеид (а) и диаграмма «расстояние от Солнца – остаточная скорость» цефеид (б). На панели (б) увеличивающимися размерами заполненных кружков обозначены звезды с ошибками скоростей $< 40 \text{ км с}^{-1}$, $< 20 \text{ км с}^{-1}$, $< 10 \text{ км с}^{-1}$, звезды с ошибками $< 5 \text{ км с}^{-1}$ обозначены открытыми кружкам; крестики — все остальные звезды выборки.

но высокие скорости, которые не объяснить ошибками. Поэтому интересно выявить, коррелируют ли скорости с другими параметрами цефеид. Возрасты этих звезд мы вычислили по формуле: $lgt = 8.50 - 0.65lgP$, где t – возраст в годах, P – период цефеиды в сутках (Ефремов (2003)).

Поскольку целью является не анализ происходящих в атмосферах прееволюционировавших звезд процессов, приводящих к изменению первичного химсостава, а исследование химической эволюции тонкого галактического диска, мы ограничились использованием содержаний только тех химических элементов, которые, согласно современным представлениям, практически не испытывают изменений, связанных с ядерными процессами в атмосферах исследуемых звезд. Такими элементами оказались, в частности, α -элементы (O , Mg , Si , и Ca), элементы железного пика (Fe), элементы медленного (Ba , La , и Ce) и быстрого нейтронных захватов (Eu) (обоснование выбора см. ниже). Исследования показали, что содержания химических элементов в атмосферах цефеид не зависят от пульсационной фазы, а значит нет систематических отличий в определениях химического состава в них и в стационарных звездах (см., например, Luck et al. (2008) и ссылки в ней). Эквивалентные ширины линий поглощения большинства химических элементов подвержены влиянию нескольких эффектов, существенно затрудняющих определение их содержаний в атмосферах цефеид. Во-первых, это отклонения от локального термодинамического равновесия (ЛТР) для сильных линий поглощения, которые в разреженных атмосферах, каковыми являются атмосферы цефе-

ид, особенно велики. Кроме того к ошибкам могут приводить принятые в исследованиях силы осцилляторов, которые обычно получают, используя спектр Солнца. Неопределенности полученных содержаний химических элементов зависят от величины ускорения силы тяжести на поверхности звезды, качества используемых спектров, различия применяемых разными авторами моделей атмосфер и теорий перемешивания, а также неЛТР эффектам, различающимся даже у линий одного элемента, что приводит к систематическим искажениям результатов. Поэтому при исследовании поведения относительных содержаний различных элементов в зависимости от других физических и кинематических параметров звезд желательно использовать определения, полученные в рамках единой методики. В данной главе к кинематическим данным мы для 221 цефеиды добавили однородные данные с содержаниями вышеперечисленных девяти химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза, из работ одной группы (см. Andrievsky et al. (2013) и ссылки в ней на более ранние работы). Высокая точность полученных параметров атмосфер и содержаний химических элементов в атмосферах цефеид обеспечивалась в них использованием спектров высокого разрешения с отношением сигнал-шум > 100 . Принимая во внимание то, что для многих цефеид было исследовано по несколько спектров, точности определения относительных содержаний для элементов, имеющих более 10 линий (например, железа), достигают 0.05–0.10 dex, тогда как при 5 линиях и менее ошибки увеличиваются до 0,15–0.20 dex. Для уменьшения эффектов отклонений от ЛТР использовались преимущественно слабые линии. Авторы также проанализировали неЛТР эффекты у содержаний ряда химических элементов и пришли к выводу, что итоговые искажения содержаний нигде не превышали указанных выше ошибок их определения. В Таблице 4.1 приведены вышеописанные параметры для 221 цефеиды. В первом столбце таблицы дано название цефеиды, во втором и третьем — галактические координаты (l, b) . Гелиоцентрическое расстояние d и координаты (x, y, z) в правосторонней декартовой системе, а также галактоцентрические расстояния R_G цефеид приведены в 4–8 колонках. Следующие три столбца содержат вычисленные компоненты скоростей (V_R, V_Θ, V_Z) в цилиндрической системе координат. Далее приведена ошибка тангенциальной скорости (εV_t) . Возраст цефеид указан в столбце 13. Далее приведены металличности $[Fe/H]$ и относительные содержания восьми химических элементов $[O/Fe]$, $[Mg/Fe]$, $[Si/Fe]$, $[Ca/Fe]$, $[Ba/Fe]$, $[La/Fe]$, $[Ce/Fe]$ и $[Eu/Fe]$, а также средние относительные содержания по че-

тырем α -элементам и трем s -элементам. Для сравнения мы привлекли определения содержаний тех же элементов в 212 карликах и в более близких по эволюционному статусу к цефеидам 171 гиганте восходящей ветви и красного сгущения (кламп-гиганты), полученные коллективом авторов, использующих подобную методику (Mishenina et al. (2006); Мишенина и др. (2007); Mishenina et al. (2013)). Ошибки определения содержаний всех элементов в этих звездах не превышают 0.15 dex. Однотипность подходов при определении содержаний химических элементов в цефеидах, карликах и гигантах обеспечивается тем, что везде используется одна система солнечных сил осцилляторов, единый список спектральных линий и единая сетка моделей атмосфер (Kurucz (1993)).

4.3 Статистические связи между различными характеристиками

Одним из наиболее важных результатов, полученных из исследования цефеид и касающихся структуры и эволюции галактического диска, является исследование весьма значительного отрицательного радиального градиента металличности у столь молодых объектов (Luck et al.(2011)). Этот факт свидетельствует об увеличении скорости звездообразования с приближением к галактическому центру. На рисунке 4.2 а приведена зависимость между галактоцентрическим расстоянием и металличностью для цефеид нашей выборки. Прямая регрессия, построенная по точкам диаграммы, свидетельствует о существовании высокосignификантной корреляции ($r = 0.71 \pm 0.03$). Поскольку галактический диск вращается дифференциально, то вполне объяснимо уменьшение азимутальной компоненты скорости с увеличением галактоцентрического расстояния, которое демонстрируют цефеиды на рисунке 4.2 б, где разными значками обозначены звезды с разными ошибками скоростей. Коэффициент корреляции для выборки с ошибками тангенциальных скоростей $< 40 \text{ км с}^{-1}$ составляет $r = 0.34 \pm 0.08$, тогда как вероятность случайного появления такой корреляции при том же числе точек — $P_N \ll 1\%$, то есть корреляция является высокосignификантной. Причем, как видим, с уменьшением ошибок скоростей, зависимость становится более узкой (хотя коэффициент корреляции при этом не увеличивается из-за сужения диапазона по R_G). Из факта существования двух предыдущих корреляций можно ожидать корреляцию и между азимутальной скоростью и металличностью.

Таблица 4.1: Положения, скорости и химический состав классических цефеид (фрагмент).

Название	l , град	b , град	d , кпк	x , кпк	y , кпк	z , кпк	R_G , кпк	V_{LSR} , км с ⁻¹	V_R , км с ⁻¹	V_Θ , км с ⁻¹	V_z , км с ⁻¹	εV_t , км с ⁻¹
AA GEM	184.88	2.537	3.40	-3.39	-0.29	0.15	11.55	106	9	269	-93	57
AC MON	221.322	-1.621	2.43	-1.82	-1.60	-0.07	10.12	50	8	242	7	29
AD CRU	298.354	1.1	3.17	1.50	-2.79	0.06	6.99	101	4	234	30	41
AD GEM	194.026	7.259	2.50	-2.40	-0.60	0.32	10.48	50	26	251	4	26
AD PUP	241.644	0.138	4.09	-1.94	-3.60	0.01	10.61	149	52	272	44	40

Название	t , млн. лет	[Fe/H]	[O/Fe]	[Mg/Fe]	[Si/Fe]	[Ca/Fe]	[Ba/Fe]	[La/Fe]	[Ce/Fe]	[Eu/Fe]	[α /Fe]	[s/Fe]
AA GEM	65	-0.27	-	0.17	0.08	0.01	0.42	-	-0.01	-0.03	-	-
AC MON	82	-0.22	-0.03	-	0.14	0.09	0.32	0.35	0.02	0.4	-	0.23
AD CRU	95	0.06	-0.12	-0.02	0.03	-0.12	0.09	0.01	0.06	0.19	-0.06	0.05
AD GEM	133	-0.16	-0.15	0.11	0.05	-0.04	0.23	0.01	0.1	0.2	-0.01	0.11
AD PUP	58	-0.17	0.2	-0.09	0.03	-0.05	-	0.41	0.14	0.22	0.02	-

Однако, как видно из рисунка 4.2 в, эта корреляция для цефеид оказывается незначимой ($P_N > 5\%$). Как показала наша проверка, радиальная и вертикальная компоненты скоростей цефеид ни с металличностью, ни с галактоцентрическим расстоянием совсем не коррелируют. Зависимость между возрастом и металличностью является предметом отдельных исследований в тонком галактическом диске (см. ниже). К сожалению, у цефеид крайне ограниченный диапазон возрастов и такая корреляция, по идее, проявляться не должна. Тем не менее, на рисунке 4.2 г она есть, причем коэффициент корреляции отличен от нуля за пределами 3σ ($r = 0.22 \pm 0.06$), а вероятность случайного появления корреляции $P_N \ll 1\%$. Обращает на себя внимание, что у звезд с возрастaми примерно 50 млн. лет наблюдается большой разброс металличностей, существенно уменьшающий корреляцию. В работе (Kovtyukh et al. (2005)) разброс объясняется ошибками определения величин $[Fe/H]$ в связи с трудностями анализа атмосфер у цефеид с периодами переменности 15 дней (т.е. с возрастaми 50 млн. лет), поскольку, согласно Wallerstein et al. (1992), у них самые динамичные атмосферы, приводящие к асимметрии профилей спектральных линий. В пользу того, что определения металличности этих цефеид не подверглись систематическим изменениям, свидетельствует тот факт, что именно цефеиды с сильно отличающимися от среднего значениями металличности оказываются на самых малых и самых больших галактоцентрических расстояниях и во многом определяют величину обсуждаемого выше радиального градиента металличности. Причина возникновения этого эффекта скорее связана с селекцией, которую видно на рисунке 4.2 д, где приведена диаграмма «галактоцентрическое расстояние – возраст». Все поле точек на диаграмме можно ограничить сверху двумя наклонными линиями. При этом самые старые цефеиды лежат вблизи солнечного радиуса орбиты, тогда как цефеиды с возрастaми 50 млн. лет наблюдаются в очень широком диапазоне по расстояниям. Это и понятно — как наиболее массивные и яркие, эти звезды далеко видны. И наоборот, старые маломассивные цефеиды видны только вблизи Солнца. Для иллюстрации действия этого эффекта на рисунке 4.2 г открытыми кружками выделены цефеиды, находящиеся ближе 2 кпк от Солнца. Видно, что зависимость «возраст – металличность» стала более узкой, причем наклон регрессии в пределах ошибок остался прежним. Причиной наблюдаемой между возрастом и металличностью корреляцией является, скорее всего, тот факт, что согласно теоретическим расчетам менее металличные цефеиды, обладая при той же

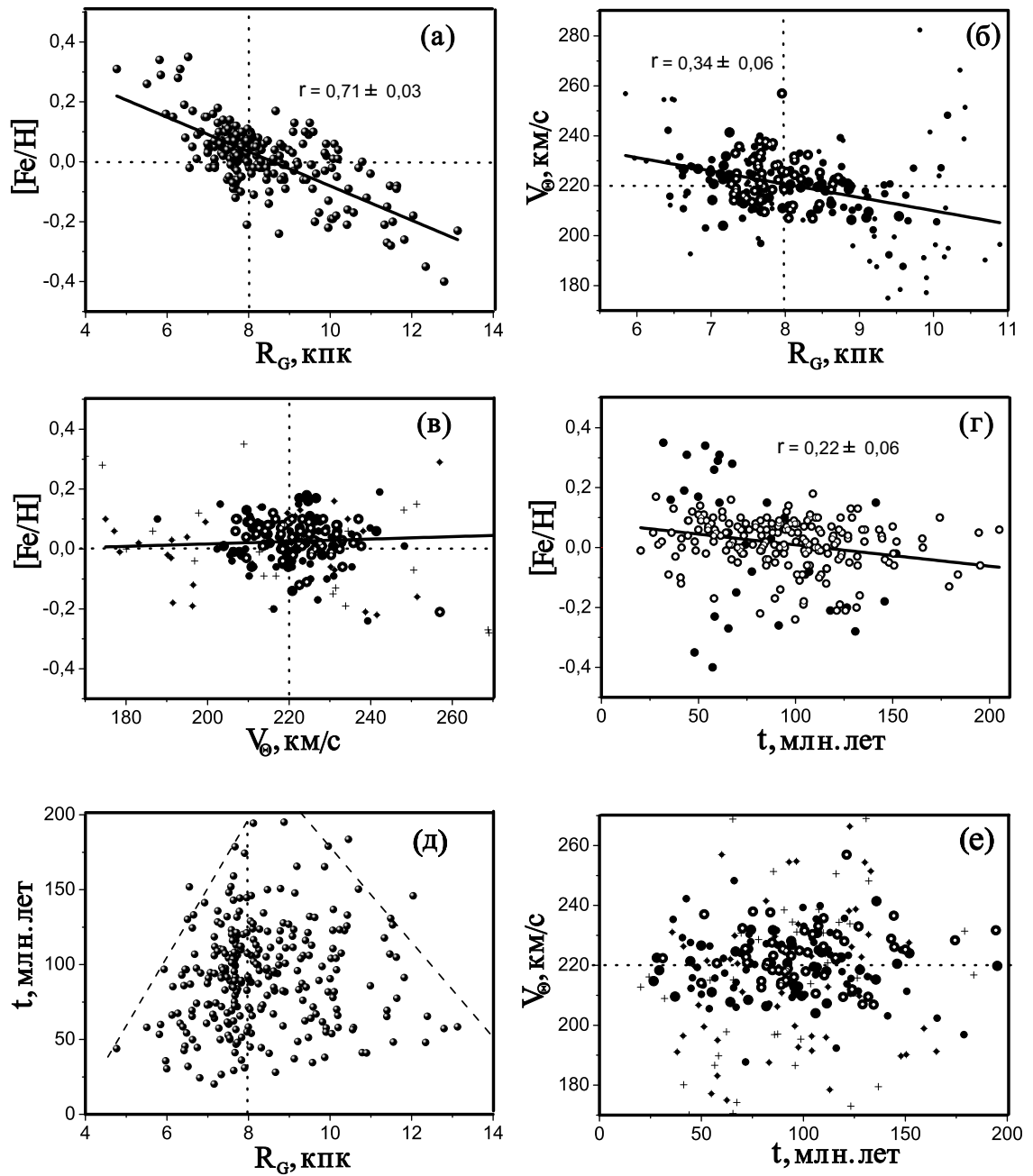


Рис. 4.2: Диаграмма «галактоцентрическое расстояние – металличность» (а), «галактоцентрическое расстояние – азимутальная компонента скорости» (б), «азимутальная компонента скорости – металличность» (в), «возраст – металличность» (г), «галактоцентрическое расстояние – возраст» (д), «возраст – азимутальная компонента скорости» (е). Обозначения на панелях (б, в, е) как на Рис. 4.1 б. Открытые кружки на панели (г) – цефеиды, лежащие ближе 2 кпк от Солнца. Сплошные наклонные линии на некоторых панелях – прямые регрессии, а вверху приведены коэффициенты корреляции (подробнее см. текст). Прямые пунктирные линии, параллельные осям координат, проведены через солнечные значения параметров.

температуре меньшей массой, попадают в полосу нестабильности при более высоком возрасте.

Заметим, что как среди цефеид, так и среди столь же молодых рассеянных скоплений обнаружены азимутальные градиенты металличности, сравнимые по величине с радиальными градиентами, демонстрируемыми теми же объектами (Lepin et al. (2011); Гожа и др. (2013)). Это означает, что межзвездное вещество в диске плохо перемешано и поэтому характер связей металличности с другими характеристиками цефеид во многом определяется глубиной их обзора.

На рисунке 4.2 е приведена диаграмма «возраст – азимутальная скорость». Видно, что корреляция между ними отсутствует. Причем у звезд любого возраста наблюдается примерно одинаковый разброс скоростей. Отсутствуют корреляции и у двух других компонент пространственной скорости. Это означает, что высокие скорости, наблюдаемые даже у цефеид с минимальными ошибками скоростей, не связаны с релаксационными процессами в галактическом диске. В противном случае дисперсия скоростей должна была бы увеличиваться с возрастом.

4.4 Зависимости относительных содержаний различных химических элементов от металличности

Согласно современным представлениям, основные процессы ядерного синтеза, в которых производятся изотопы всех химических элементов, происходят в звездах определенных масс. В частности, основное количество α -элементов синтезируется в недрах массивных ($M > 10M_{\odot}$) звезд, находящихся на поздних стадиях своей эволюции, и выбрасывается в межзвездную среду в результате их вспышек как сверхновые второго типа (см., например, Timmes et al. (1995)). При этом только кислород и магний производятся исключительно в этих звездах, тогда как остальные α -элементы могут синтезироваться в небольших количествах и в SNe Ia. Вместе с тем, относительные содержания еще двух α -элементов — кремния и кальция — изменяются с ростом металличности у карликов диска подобно кислороду и магнию, т. е. вклад в их обилие от SNe Ia невелик (Mishenina et al. (2013)). Содержания перечисленных элементов практически не изменяются и в атмосферах звезд на продвинутых стадиях эволюции, то есть в красных гигантах и в гигантах красного сгущения, у которых в ядре уже горит гелий (см. Mishenina et al. (2006)). Не претерпевают существенных изменений их содержания и в атмосферах цефеид (Kovtyukh et al. (2005)). Для исследования мы использовали

содержания только четырех α -элементов — O , Mg , Si и Ca . Из оставшихся α -элементов содержание серы определяется очень ненадежно из-за небольшого числа линий в видимой области и необходимости учитывать их расщепление и неЛТР эффекты (Коротин (2009)), а титан некоторые исследователи относят к элементам железного пика.

Полагают, что синтез основного количества атомов элементов быстрого нейтронного захвата происходит непосредственно во время вспышек SNe II с массами $8 < M/M_{\odot} < 10$ (Woosley (1994)). Содержание европия на Солнце, в частности, на 94% обеспечено r -процессом (Serminato et al. (2009)). Хотя конкретные механизмы производства химических элементов в r -процессах до конца не выяснены, но в любом случае они связаны с конечными стадиями эволюции короткоживущих массивных звезд (Thielemann et al. (2011)). При вспышках SNe II образуется и некоторое количество атомов элементов железного пика. (Мы использовали только содержание железа.) Основное же количество элементов группы железа производится при взрывах SNe Ia, являющихся конечной стадией эволюции тесных двойных звезд с массами $< 8M_{\odot}$ (Thielemann et al. (1986); Travaglio et al. (2011); Kusakabe et al. (2011)).

Химические элементы, произведенные в процессах ядерного синтеза в звездах отличающихся масс, выбрасываются в межзвездную среду на разных временах. Так время эволюции массивных звезд (предшественников SNe II), обогащающих межзвездную среду α -элементами, элементами r -процесса и небольшим количеством железа, не превышает 30 млн. лет, а массовые вспышки сверхновых SN Ia, вносящих основной вклад в обогащение межзвездной среды элементами группы железа, наступает через $\approx 1 - 1.5$ млрд. лет (Matteucci, Greggio (1986); Yoshii et al. (1996)). Поэтому у новых поколений звезд относительные содержания $[\alpha/Fe]$ и $[r/Fe]$ будут уменьшаться с увеличением металличности. Это обстоятельство удобно использовать для изучения истории звездообразования в звездно-газовой системе. Особенностью исследования зависимостей относительных содержаний химических элементов от металличности у цефеид заключается в том, что в силу молодости этих звезд диапазон по $[Fe/H]$ у них настолько мал, что оказывается не намного больше ошибок индивидуальных определений. Поэтому корреляции « $[\alpha/Fe] - [Fe/H]$ » и « $[r/Fe] - [Fe/H]$ », возникающие по вышеописанной причине, у них не должны проявляться. Тем не менее, некоторые закономерности все же наблюдаются (см., например, Kovtyukh et al. (2005)). Статистически значимо выявить существующие корреляции возможно лишь с помощью

выборки цефеид достаточно большого объема.

Элементы медленного нейтронного захвата также производятся в звездах разных масс. Основное их количество при солнечных металличностях производится в результате тепловых пульсаций в атмосферах гигантов асимптотической ветви (АВГ-звездах) с массами $M < 4M_{\odot}$ (главная компонента s -процесса) и путем сброса оболочки попадает в межзвездное пространство (Gallino et al. (1998)). (Заметим, что небольшой процент АВГ-звезд оказывается тесными двойными, которые взрываются впоследствии как SNe Ia.) Достаточное количество нейтронов в атмосферах АВГ-звезд производится в результате тепловых пульсаций в реакциях $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ (Gallino et al. (1998); Bisterzo et al. (2011)). При этом, чем больше металличность, тем больше нейтронов и выход элементов s -процесса увеличивается. Однако согласно теоретическим расчетам, вблизи $[Fe/H] \approx -0.2$ образуется пик выхода и при дальнейшем увеличении металличности отношение $[s/Fe]$ уменьшается, причем для тяжелых s -элементов это уменьшение значительно сильнее, чем для легких (Cristallo et al. (2009)). Еще некоторое количество атомов элементов s -процесса производится при высоких температурах в реакциях $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ в результате горения гелия в недрах массивных звезд — это слабая компонента s -процесса (Woosley (1994), Pignatari et al. (2010)). Недавние оценки (Serminato et al. (2009)) показывают, что содержание тяжелых s -элементов (т.е. элементов второго пика) на Солнце — бария на 80 – 90 %, лантана на 60 – 65 %, церия и самария на 99 % - обеспечено главным компонентом s -процесса, т.е. АВГ-звездами. Тогда как высокий процент атомов Pr и Nd синтезируется в r -процессе при вспышках SNe II (Travaglio et al. (2004)), т.е. в более массивных звездах. К сожалению, наиболее типичный s -элемент – самарий — определен в очень малом количестве цефеид. Хотя значительная часть атомов s -элементов первого пика (Y, Zr) также произведена в главном компоненте, но у них иная, чем у элементов второго пика, зависимость от металличности. В итоге мы оставили для анализа только три тяжелых элемента s -процесса — Ba, La и Ce .

На рисунках 4.3 а-г. приведены зависимости от металличности относительных содержаний четырех α -элементов — O, Mg, Si и Ca . Косыми крестиками нанесены аналогичные зависимости для красных гигантов, а малыми темно серыми кружками – для карликов. Содержания всех перечисленных элементов в цефеидах получены в ЛТР приближении по эквивалентным ширинам их линий. Расчет содержаний кремния и каль-

ция в карликах и гигантах также произведен по эквивалентным ширинам в ЛТР приближении, тогда как содержания кислорода — по синтетическому спектру, а магния — по вычисленным профилям линий с учетом отклонений от ЛТР. Дисперсии относительных содержаний кислорода и магния у цефеид, как видно из первых двух графиков рисунка 4.3, существенно больше, чем у других типов звезд. Одновременно наблюдаются значительные дефициты средних содержаний обоих элементов по сравнению с другими звездами: даже если ограничить диапазон металличности всех объектов величиной $[Fe/H] = \pm 0.15$ (в нем находится 85 % цефеид), то $\Delta[O/Fe] = -0.08 \pm 0.02$, а $\Delta[Mg/Fe] = -0.07 \pm 0.02$.

Можно предположить, что в цефеидах заниженное обилие кислорода может быть связано с принятием ошибочных значений сил осцилляторов для его линий (Kovtuykh et al. (2005)), а небольшой дефицит магния вполне может получиться из-за протекания $Mg - Al$ цикла. Несмотря на большие ошибки, оба элемента у цефеид обнаруживают слабые тенденции к уменьшению относительных содержаний с увеличением металличности ($r = 0.14 \pm 0.07$ и 0.20 ± 0.07 соответственно, при $P_N < 5\%$). У карликов и гигантов аналогичные зависимости более узкие, наклоны больше, а корреляции существенно более значимые. По-видимому, разброс относительных содержаний у цефеид обязан большим ошибкам определений содержаний в столь нестабильных звездах и более значительным у них неЛТР эффектам. Относительные содержания кремния и кальция у цефеид при малом разбросе уверенно уменьшаются с ростом металличности точно так же, как и у двух других типов звезд ($r = 0.4 \pm 0.1$ и 0.3 ± 0.1 соответственно, при $P_N \ll 1\%$). Но как и у двух предыдущих α -элементов, обе зависимости лежат на $\Delta[Si/Fe] = -0.06 \pm 0.01$ и $\Delta[Ca/Fe] = -0.07 \pm 0.01$ ниже, чем у гигантов. Заметим, что хотя содержания обоих элементов во всех типах звезд определялись по эквивалентным ширинам в ЛТР приближении, последовательности кремния у цефеид и гигантов лежат по разные стороны от зависимости карликов, тогда как последовательности кальция у карликов и гигантов практически совпадают. Обсуждаемые систематические занижения содержаний каждого элемента могут у цефеид, вообще говоря, получиться из-за неучета отклонений от ЛТР, которые у цефеид могут оказаться наибольшими. Но вряд ли для всех элементов эти отклонения имеют одинаковые знаки. К тому же содержания кислорода у карликов и гигантов также получены без учета ЛТР-эффектов (поскольку для линий кислорода они незначительны), а содержания кремния и кальция вообще

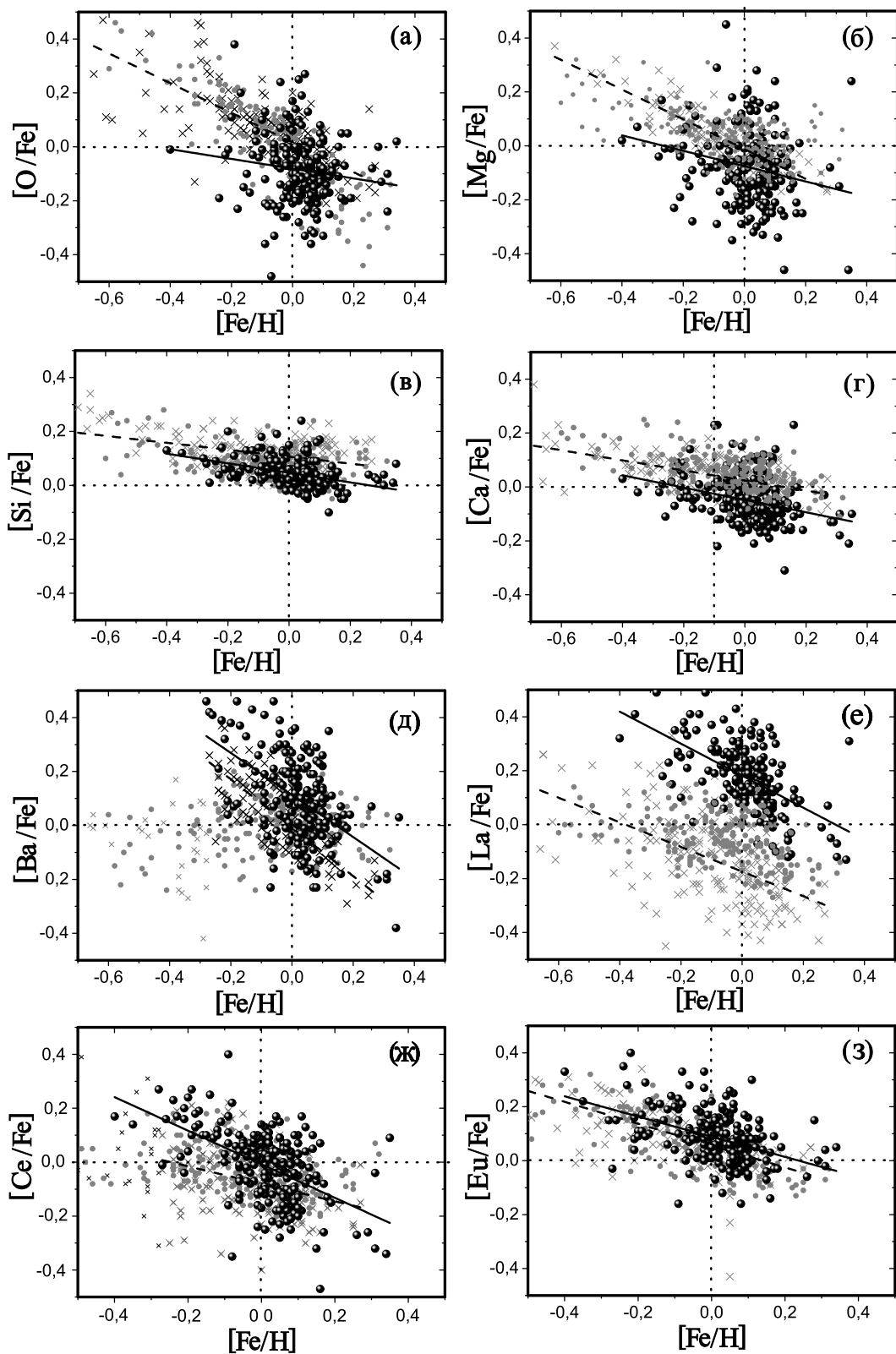


Рис. 4.3: Зависимости относительных содержаний восьми химических элементов от металличности в цефеидах (большие заполненные кружки), красных гигантах (косые крестики) и карликах поля (малые темно серые кружки). Сплошные наклонные линии – прямые регрессии для цефеид, а штриховые – для гигантов. Прямые пунктирные линии, параллельные осям координат, проведены через солнечные значения параметров.

определены одинаковой методикой у всех звезд. Чтобы несколько скомпенсировать возможные систематические отклонения в определениях содержаний каждого элемента, в дальнейшем мы будем исследовать поведение усредненных содержаний всех четырех α -элементов. Зависимости от металличности относительных содержаний трех тяжелых s -элементов - Ba , La и Ce - приведены на рисунках 4.3 д-ж. Содержания бария в цефеидах и карликах определены по синтетическим спектрам нескольких линий в неЛТР приближении, а в гигантах - в ЛТР приближении по синтетическому профилю сильной линии ионизованного бария. Несмотря на различие методов, в характерном для цефеид диапазоне металличности ($[Fe/H] > -0.30$) у цефеид и гигантов наклоны зависимостей $[Ba/Fe]$ от $[Fe/H]$ в пределах ошибок совпадают, но последовательность цефеид лежит выше на $\Delta[Ba/Fe] = +0.12 \pm 0.02$. Зато карлики практически не обнаруживают наклона. Причем вблизи солнечной металличности отношения $[Ba/Fe]$ в карликах и гигантах примерно солнечные, то есть относительно обоих типов звезд у цефеид наблюдается одинаковый избыток бария. Содержания лантана и церия во всех звездах получены в ЛТР приближении по измеренным эквивалентным ширинам линий. Из рисунка видно, что величины относительных содержаний и этих s -элементов уменьшаются с ростом $[Fe/H]$ (в обоих случаях $P_N \ll 1\%$). При этом оба элемента также демонстрируют повышенные содержания по сравнению с гигантами и карликами. Причем, у цефеид и гигантов наклоны зависимостей $[La/Fe]$ от $[Fe/H]$ в пределах ошибок совпадают, а превышение у цефеид очень большое $\Delta[La/Fe] = +0.35 \pm 0.02$. Наклон зависимости относительного содержания церия у цефеид за пределами ошибок больше, чем у гигантов, а превышение меньше, чем у двух предыдущих s -элементов $\Delta[Ce/Fe] = +0.07 \pm 0.02$. У карликов наклоны у всех элементов даже в ограниченном по металличности диапазоне лишь немногим отличны от нуля. Таким образом, независимо от используемого метода относительные содержания каждого элемента s -процесса у цефеид всегда оказываются завышенными. Поскольку все перечисленные элементы медленного нейтронного захвата ведут себя в цефеидах примерно одинаково относительно гигантов, в дальнейшем мы будем использовать среднее по всем трем тяжелым элементам s -процесса.

Поведение типичного элемента быстрого нейтронного захвата - европия - приведено на рисунке 4.3 з. Содержания европия в цефеидах определены в ЛТР приближении по эквивалентным ширинам, тогда как в карликах и гигантах - методом синтетического спектра с учетом сверх-

тонкой структуры. Вероятности случайного возникновения всех корреляций $P_N \ll 1\%$. Несмотря на различие методов, наклоны зависимостей « $[Eu/Fe] - [Fe/H]$ » у всех трех типов звезд практически совпадают, обнаруживая в среднем смещение ($\Delta[Eu/Fe] \approx +0.05 \pm 0.01$) в сторону большего обилия у цефеид по сравнению с гигантами. Такое поведение поддерживает представление о том, что родившиеся практически одновременно, но далеко разнесенные друг от друга цефеиды образовались из вещества, в котором основной вклад в обогащение европием внесли звезды больших масс.

Таким образом, относительные содержания всех исследуемых α -элементов в цефеидах демонстрируют в той или иной степени более низкие отношения $[\alpha/Fe]$, чем у других звезд поля (в том числе и Солнца). Зато относительные содержания всех исследуемых элементов s - и r -процессов в цефеидах оказываются завышенными по сравнению со звездами поля. При этом все элементы демонстрируют уменьшение относительных содержаний с ростом металличности.

4.5 Связь относительных содержаний химических элементов разных процессов с другими параметрами

На Рис. 4.4 а–в приведены зависимости от металличности относительных содержаний α -элементов, элементов быстрого и медленного нейтронных захватов для цефеид, гигантов и карликов. При таком усреднении в каждой звезде несколько компенсируются ошибки с разными знаками в определениях обилий элементов, произведенных в одном процессе. Как видим, относительные содержания элементов, произведенных в α - и r -процессах, примерно одинаково уменьшаются с ростом металличности у всех объектов. Из проведенных на рисунках 4.4 а,б прямых регрессий для цефеид и гигантов видно, что на каждом рисунке наклоны в пределах ошибок совпадают. При этом последовательности у карликов и гигантов практически совпадают, тогда как у цефеид последовательность α -элементов лежит за пределами 3σ ниже ($\Delta[\alpha/Fe] = -0.07 \pm 0.01$), чем у гигантов и карликов, а последовательность содержаний элемента r -процесса — за пределами ошибок выше ($\Delta[Eu/Fe] = +0.03 \pm 0.01$). Наклон зависимости $[s/Fe]$ от $[Fe/H]$ у цефеид примерно такой же, как у гигантов с такой же металличностью (т. е. с $[Fe/H] > -0.30$). Но лежат при этом цефеиды намного выше ($\Delta[s/Fe] = +0.19 \pm 0.01$). У карликов

наклон этой зависимости практически отсутствует, а сама она в этом диапазоне металличности проходит между гигантами и цефеидами. В итоге получается, что продвинутые в своей эволюции звезды демонстрируют: гиганты – дефицит, а цефеиды – избыток относительных содержаний элементов s -процесса по сравнению с обычными карликами. Заметим еще раз, что природа зависимости от металличности у s -элементов и у двух других типов элементов различна. Если выход s -элементов уменьшается с ростом металличности их родительских звезд (см., например, Serminato et al. (2009)), то относительные содержания α -элементов и элементов r -процесса уменьшаются в следующих более металличных поколениях звезд из-за более позднего наступления эпохи массовых выбросов железа из SNe Ia. Обратим внимание, что цефеиды выборки расположены на различных галактоцентрических расстояниях, поэтому на характер зависимостей $\llbracket [el/Fe] - [Fe/H] \rrbracket$ влияет отрицательный радиальный градиент металличности. При этом на разных расстояниях, в принципе, может быть своя история химической эволюции, вклад в которую падающей на диск материи из внешних областей Галактики неодинаков. Чтобы оценить степень искажения зависимостей, мы ограничили выборку цефеид расстоянием от Солнца < 1.5 кпк. В этот радиус попало 90 цефеид. Оказалось, что построенные по этим звездам зависимости элементов всех трех процессов от металличности практически совпали с приведенными на Рис. 4.4 а–в (не приведены, чтобы не загромождать рисунок). Это означает, что химическую историю межзвездного вещества в пределах объема, занимаемого цефеидами нашей выборки, можно считать примерно одинаковой.

На графике (а) обращает на себя внимание то, что у цефеид на диаграмме $\llbracket [Fe/H] - [\alpha/Fe] \rrbracket$ вблизи солнечной металличности наблюдается «выброс» одиннадцати точек с избыточными отношениями $[\alpha/Fe] > 0.07$. У гигантов и карликов эти зависимости много тоньше и практически линейны. Этот «выброс» сформировался у цефеид, как можно увидеть на рисунках 4.3 а–г, из-за проявления в той или иной степени подобной детали у всех α -элементов (превышения относительно средних составляют: $\delta[O/Fe] \pm 0.15$, $\delta[Mg/Fe] \approx 0.35$, $\delta[Si/Fe] \approx 0.05$, $\delta[Ca/Fe] \approx 0.15$). Т. е. его нельзя признать случайным и образовавшимся в результате ошибок определения содержания какого-то одного элемента. В пользу реальности этого «выброса» может свидетельствовать также схожесть других параметров большинства принадлежащих ему цефеид.

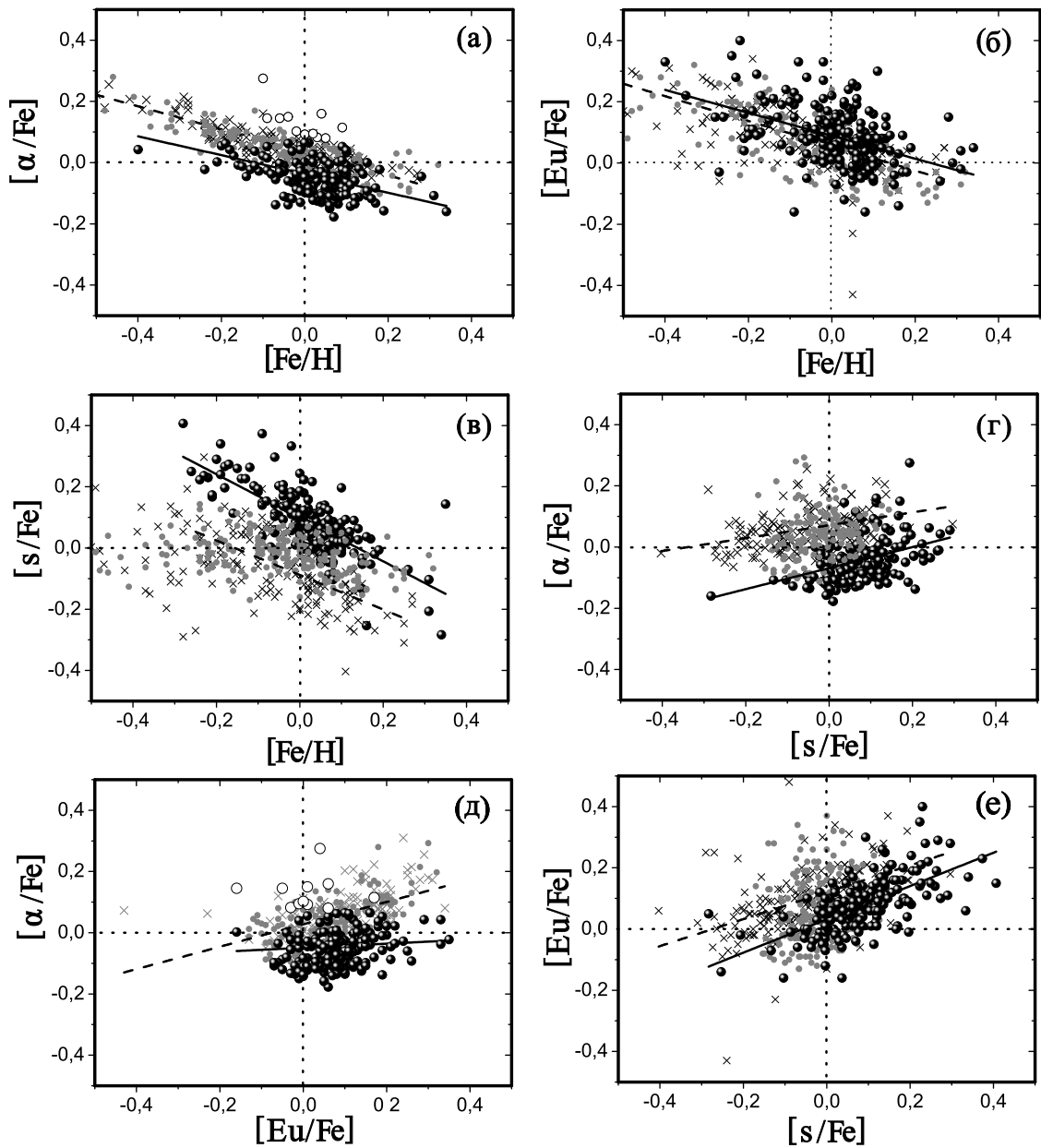


Рис. 4.4: Зависимости относительных содержаний α -элементов (а), элементов быстрого (б) и медленного (в) нейтронных захватов от металличности. На панелях (г, д, е) — взаимные корреляции относительных содержаний элементов, произведенных в разных процессах. Обозначения как на рисунке 4.3. На панелях (а, д) открытыми кружками обозначены цефеиды с $[\alpha/Fe] > 0.07$.

Так все они лежат в направлении галактического вращения, по возрасту у них наблюдается диапазон 100 ± 20 млн. лет, а по расстояниям от Солнца - 1.5 ± 0.3 кпк. Кроме того, у 11 цефеид «выброса» существует значимая корреляция между возрастом и галактической долготой (см. рисунок 4.5 а). Получается, что волна образования звезд с повышенным относительным содержанием α -элементов пошла от больших галактоцентрических расстояний к малым (см. рисунок 4.5 б). Причем азимутальная компонента скорости у этих цефеид монотонно увеличивается с уменьшением R_G (рисунок 4.5 в), как бы прописывая кривую вращения тонкого диска.

На следующих трех графиках рисунков 4.4 г, д, е приведены зависимости между содержаниями элементов, полученных в трех процессах ядерного синтеза. Элементы s -процесса, как видим, и у цефеид, и у других звезд поля хорошо коррелируют как с α -элементами, так и с элементом r -процесса – европием (для цефеид: $r = 0.4 \pm 0.1$ и 0.6 ± 0.1 соответственно). В то же время у цефеид α -элементы с европием практически не коррелируют, тогда как у гигантов и карликов корреляции отличны от нуля далеко за пределами ошибок, а зависимости полностью совпадают. Как уже отмечалось, согласно современным представлениям, α -элементы и элементы r -процесса выбрасываются в межзвездную среду при вспышках сверхновых второго типа. Причем производство и тех и других элементов от металличности сверхновых не зависит. Поэтому между относительными содержаниями этих элементов можно ожидать корреляцию. Из рисунка 4.4 д видно, что эта корреляция у цефеид нивелируется наличием на диаграмме уже упоминаемых 11 звезд с высокими содержаниями α -элементов (без звезд этого «выброса» корреляция становится значимой, но наклон получается примерно в два раза меньше, чем у других звезд поля). Цефеиды «выброса» имеют практически солнечное, то есть низкое относительное содержание европия. Поскольку преимущественное образование α -элементов происходит в звездах с массами $> 10M_{\odot}$, а элементов r -процесса при вспышках менее массивных ($8-10M_{\odot}$) SNe II (см., например, Travaglio et al. (1999)), можно предположить, что цефеиды «выброса» образовались $\approx (100 - 150)$ млн. лет назад из вещества, которое было обогащено массивными сверхновыми. Тогда как вещество, из которого образовывалось основное количество цефеид, было обогащено главным образом менее массивными сверхновыми.

Удивляет наличие корреляции между элементами s - и r -процессов на рисунке 4.4 е. Дело в том, что, как отмечалось выше, в обогащение эле-

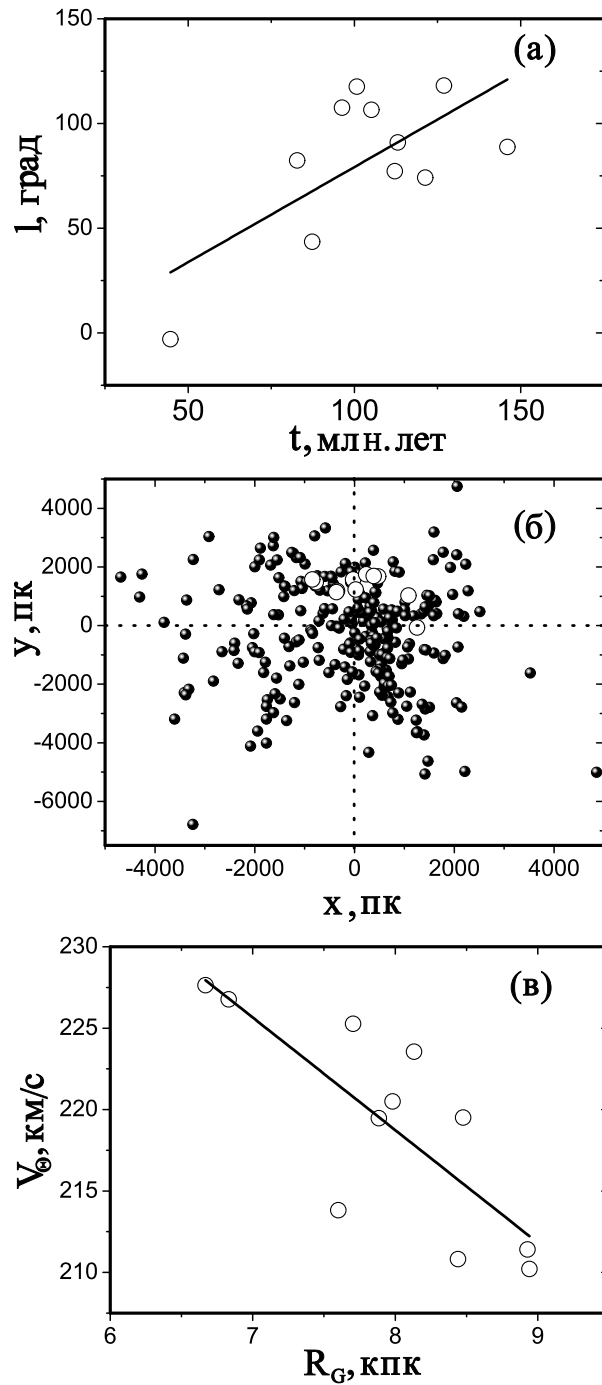


Рис. 4.5: Диаграмма «возраст – галактическая долгота» (а), положения в проекции на галактическую плоскость (б) и «галактоцентрическое расстояние – азимутальная компонента скорости» (в) для цефеид с избытком $[\alpha/Fe] > 0.07$. На панели (б) открытые кружки — цефеиды с избытком α -элементов, заполненные кружки — все остальные цефеиды. Наклонные линии — прямые регрессии.

ментами s -процесса при солнечной металличности в основном вносят вклад маломассивные ($< 4M_{\odot}$) гиганты асимптотической ветви. Некоторые из этих звезд, будучи тесными двойными, взрываются впоследствии как SN Ia, обогащая межзвездную среду железом. Т. е., оба процесса

идут последовательно в одних и тех же звездах, а значит выбрасываемое ими в межзвездную среду относительное количество атомов элементов s -процесса не должно, казалось бы, зависеть от металличности. Однако, и цефеиды и звезды поля на рисунке 4.4 е демонстрируют примерно одинаковые тесные зависимости между элементами медленного и быстрого нейтронных захватов, правда несколько смещенные друг относительно друга. Существование корреляций скорее всего связано с тем, что выход относительного количества элементов s -процесса уменьшается с увеличением металличности АВГ-звезд, в атмосферах которых происходит их образование (см., например, Cristallo et al. (2009)). В итоге, как это видно из верхних графиков рисунка 4.4, зависимости относительных содержаний s -элементов от металличности у всех звезд оказались очень похожими на аналогичные зависимости относительных содержаний α - и r -элементов, причина появления которых связана с последовательностью обогащения межзвездной среды этими элементами и железом.

На рисунках 4.6 а, б, в приведены зависимости содержаний элементов тех же процессов в цефеидах от их галактоцентрического расстояния (R_G). (Карлики и гиганты лежат от Солнца не далее 100 пк и аналогичные диаграммы для них построить невозможно.) Видим, что относительные содержания α -элементов и элементов r -процесса значимо (у всех $P_N \ll 1\%$) увеличиваются с ростом металличности (причем даже если не исключать звезды «выброса» на первой панели). Поскольку по цефеидам наблюдается уверенный отрицательный градиент металличности (Рис. 4.2 а), а относительные содержания элементов обоих процессов с ростом металличности уменьшаются (рисунки 4.4 а, б), то на больших галактоцентрических расстояниях, где металличность меньше, относительные содержания α - и r -элементов и должны быть выше. Относительные содержания элементов s -процесса на рисунке 4.6 в также увеличиваются с ростом галактоцентрического расстояния, но это связано, как уже было отмечено, не с химической эволюцией межзвездного вещества, а с внутренними процессами, происходящими в синтезирующих эти элементы звездах. Обратим внимание на одну деталь на графике рисунка 4.6 в — излом зависимости около $R_G \approx 6.5$ кпк. В этом же месте наблюдается излом и на зависимости $[Fe/H]$ от R_G на рисунке 4.2 а. Полагают, что он связан с эффектами коротации в галактическом диске (Acharova et al. (2010), Acharova et al. (2012)). Заметим, что в цефеидах абсолютные содержания $[el/H]$ всех обсуждаемых здесь элементов (кроме бария) обнаруживают отрицательные радиальные градиенты в га-

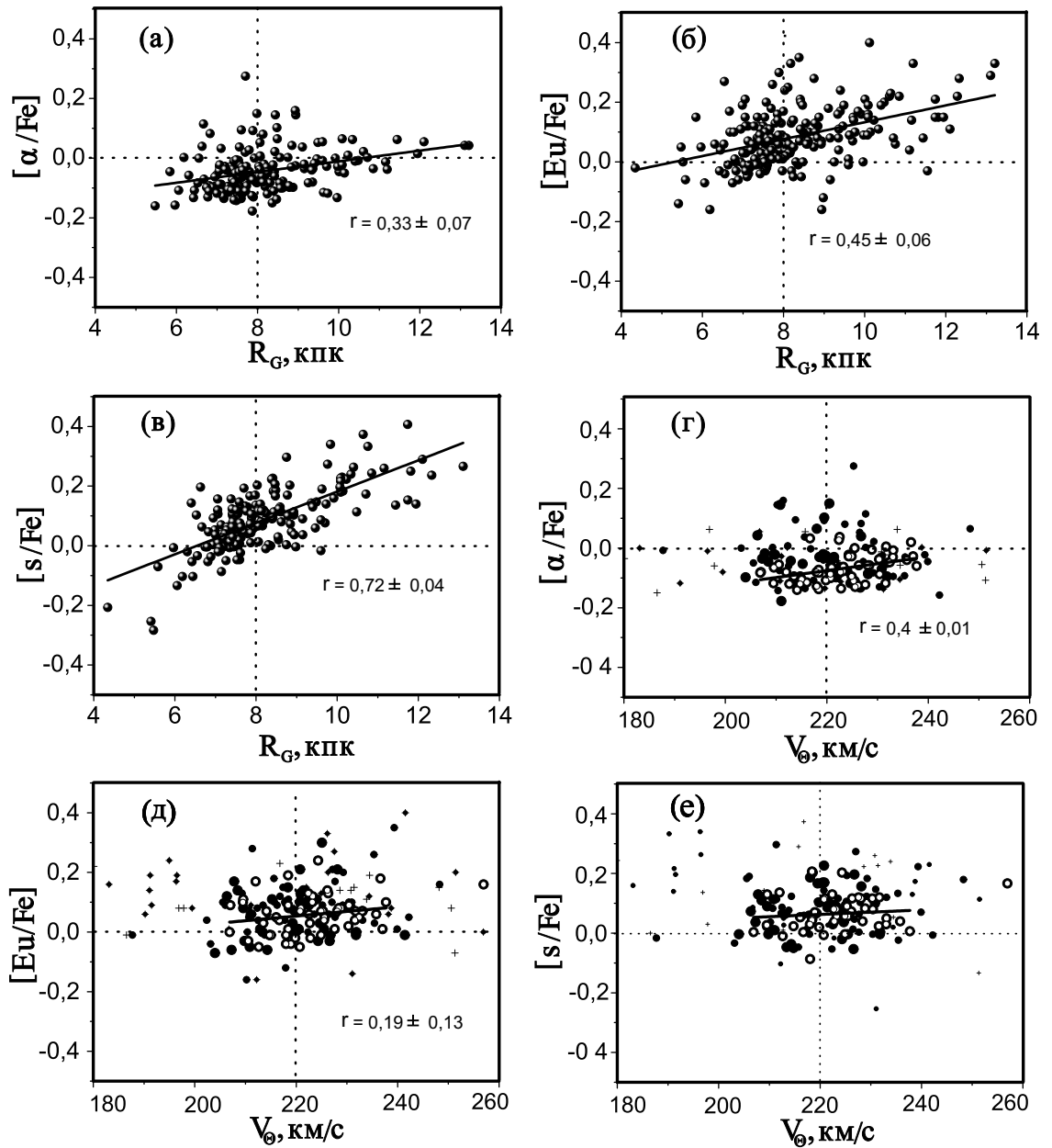


Рис. 4.6: Радиальный градиент относительных содержаний α -элементов (а), r -элементов (б) и s -элементов (в) цефеид. Зависимость α -элементов (г), r -элементов (д) и s -элементов (е) от азимутальной компоненты скорости цефеид. Обозначения на панелях (г, д, е) как на рисунке 4.1 б.

лактическом диске (Andrievsky et al. (2013)). Относительные же содержания всех элементов, в том числе и бария, демонстрируют на рисунке 4.6 уверенное увеличение с ростом галактоцентрического расстояния. Поскольку одной из целей настоящей работы является выяснение, отличаются ли по химическому составу цефеиды с высокими скоростями от всех остальных, на рисунках 4.6 г, д, е приведены зависимости относительных содержаний тех же элементов от азимутальной компоненты

скорости. На всех графиках разными значками обозначены звезды с разными величинами ошибок определения скоростей. Прямые регрессии проведены на всех панелях для цефеид с ошибками скоростей менее 5 км с^{-1} . Очень слабая корреляция, но отличная от нуля за пределами ошибок, наблюдается только для α -элементов, хотя и у других элементов видно некоторое увеличение относительных содержаний с увеличением скорости. (Заметим, что звезды с такими ошибками скоростей все лежат от нас ближе 1 кпк и корреляции не связаны с радиальными градиентами.) Т.е. такие ошибки скоростей не позволяют статистически значимо выявить корреляции, если они, конечно, существуют. Ни на одной диаграмме не удается также обнаружить детали, которые бы свидетельствовали о связи скорости с аномальными содержаниями каких-либо химических элементов — не наблюдается статистически выявляемых сгущений точек и разброс всех содержаний не зависит от скорости. Как показал анализ, две другие компоненты пространственной скорости также не коррелируют с химическими элементами обсуждаемых трех процессов. Это говорит о том, что цефеиды поля, в отличие от рассеянных звездных скоплений (Гожа и др. (2012a), Гожа и др. (2012b)), образуются в результате единого процесса, стимулирующего звездообразование в галактическом диске — вероятнее всего под воздействием спиральных волн плотности.

4.6 Итоги четвертой главы

Изменение относительных содержаний некоторых химических элементов $[el/Fe]$ с увеличением металличности удается интерпретировать в рамках химической эволюции звездно-газовой системы только в случае, если в ней общее содержание тяжелых элементов в среднем со временем увеличивается, т.е. если металличность является статистическим индикатором возраста. Однако исследование металличности в тонком галактическом диске показывает, что среди звезд любого возраста существует большой разброс в содержаниях тяжелых элементов, который мешает выявлению зависимости между возрастом и металличностью в подсистеме. Вывод об отсутствии такой зависимости делается во многих работах (см., например, Edvardsson et al. (1993); Feldzing et al. (2001); Holmberg et al. (2009)). Однако в других работах этот вывод оспаривается и утверждается, что зависимость на самом деле существует, но она замыкается ошибками определения возрастов и радиальной миграцией звезд (см., например, Pont, Eyer (2004); Karatas et al. (2005);

Rocha-Pinto et al. (2006); Reid et al. (2010); Haywood (2008)). В третьей главе на основе нашей полной выборки F–G- карликов тонкого диска, расположенных в окрестностях 70 пк от Солнца, проанализировали селекционные эффекты, систематические эффекты случайных ошибок в определении возрастов и эффекты радиальной миграции звезд. В итоге мы показали, что первые несколько миллиардов лет формирования тонкого диска межзвездное вещество в нем действительно демонстрировало в среднем примерно одинаковое содержание тяжелых элементов ($\langle [Fe/H] \rangle \approx -0.2$) и низкую однородность, но с возрастом дисперсия металличности непрерывно уменьшалась от $\sigma_{[Fe/H]} \approx 0.22$ до ≈ 0.13 . Однако примерно 4 – 5 млрд. лет назад средняя металличность стала систематически увеличиваться, сохраняя неизменной дисперсию. Было выдвинуто предположение, что низкая на начальных этапах формирования тонкого галактического диска скорость звездообразования внезапно увеличилась около 4 – 5 млрд. лет назад. Поэтому металличность в тонком диске последние ≈ 5 млрд. лет можно рассматривать как временной параметр и объяснять наблюдаемые различия в относительных содержаниях α - и r -элементов в цефеидах по сравнению с другими звездами поля в рамках химической эволюции межзвездного вещества. Выше мы отмечали, что наблюдаемое на рисунках 4.4 а, б у цефеид и звезд поля уменьшение относительных содержаний α -элементов и элементов r -процесса с металличностью связано с более поздним выбросом в межзвездную среду основного количества атомов элементов группы железа. Поскольку в тонком диске металличность все же является индикатором возраста, а диапазон возрастов у гигантов и карликов намного превышает время эволюции предшественников SN Ia, то для этих звезд такие зависимости имеют эволюционный смысл. В частности, высокие значимости прямолинейных зависимостей у карликов и гигантов на рисунках 4.4 а, б свидетельствуют о том, что отмеченная выше вспышка звездообразования в тонком диске увеличила не скорость, а эффективность звездообразования. Т.е. увеличилось лишь общее количество образующихся звезд. (Этот вывод подтверждают и рисунок 4.3 и рисунок 4.4 — на них можно увидеть, что плотность карликов и гигантов в диапазоне ($[Fe/H] > -0.2$) заметно больше, чем менее металличных.) При увеличении скорости звездообразования (т.е. при более частом рождении новых звезд) наклоны зависимостей $[\alpha/Fe]$ от $[Fe/H]$ и $[r/Fe]$ от $[Fe/H]$ должны были бы в диапазоне $[Fe/H] > -0.2$ стать меньше (именно от такой металличности начинается ее рост 4 – 5 млрд. лет назад), поскольку увеличился

бы вклад от массивных сверхновых второго типа. Следует иметь в виду, что многие из близких сейчас карликов и гигантов пришли сюда с далеких галактоцентрических расстояний, а значит зависимость от $[Fe/H]$ несет в себе отпечаток радиального градиента металличности в галактическом диске. Поэтому увеличение эффективности звездообразования должно практически одновременно произойти в большом объеме тонкого диска, по крайней мере таком, какой в настоящее время занимают цефеиды нашей выборки. В противоположность карликам и гигантам, цефеиды очень молодые звезды и наблюдаемые у них зависимости $[\alpha/Fe]$ от $[Fe/H]$ и $[r/Fe]$ от $[Fe/H]$ свидетельствуют не об их последовательном рождении, а только об отсутствии однородности химического состава межзвездного вещества, в котором происходило звездообразование. Из рисунков 4.4 а, б видно, что при данной металличности у них ширины зависимостей лишь немногим меньше общих разбросов относительных содержаний α - и r -элементов. Тем не менее, корреляции значимые и на обеих панелях зависимости параллельны, но отстоят друг от друга за пределами ошибок. Параллельность означает, что все звезды образовывались из вещества, испытавшего, скорее всего, одну и ту же историю обогащения химическими элементами. По-видимому, звездообразование в свое время миновало какие-то области межзвездного вещества, и только потом из него образовались молодые звезды, представителями которых являются нынешние цефеиды. В итоге, существование самих зависимостей у цефеид свидетельствует о слабом перемешивании межзвездного вещества и «отсроченном» звездообразовании в некоторых областях, когда в одно и то же время недалеко друг от друга образуются звезды с разными содержаниями тяжелых элементов (см. также Lepin et al. (2011); Гожа и др. (2013)). Обратим внимание, что среди наших близких карликов и гигантов практически отсутствуют звезды с возрастными характеристиками для цефеид, поэтому наблюдается значительный разрыв в возрастах между цефеидами и другими звездами. Таким образом, систематически заниженные относительные содержания α -элементов и завышенные содержания элементов r -процессов у цефеид по сравнению с карликами и гигантами поля можно объяснить тем, что при достижении в межзвездной среде примерно солнечной металличности очень массивные звезды перестали взрываться как сверхновые и в результате резко сократилось количество выбрасываемых в межзвездную среду атомов α -элементов. Ввиду того, что сверхновые больших масс во время вспышек производили и значительное количество элементов группы железа, в межзвезд-

ной среде отношения $[r/Fe]$ увеличились, но итоговые величины $[\alpha/Fe]$ все же уменьшились. Впоследствии из нее и образовались наблюдаемые в настоящее время цефеиды. Такое предположение поддерживает и наблюдательный факт, заключающийся в том, что у всех исследованных в других галактиках предшественников сверхновых второго типа максимальные массы не превышают ≈ 20 масс Солнца (см. Smartt et al. (2009); Kochanek et al. (2008)). Избыток элементов s -процессов в цефеидах также можно объяснить прекращением вспышек массивных SNe II, обогащавшими межзвездную среду кроме α -элементов еще и значительным количеством элементов группы железа. Но в атмосферах массивных звезд в слабой компоненте s -процесса также производится и некоторое количество s -элементов. Вполне вероятно, что эти звезды и без взрыва могут сбрасывать верхние части своих оболочек, подобно АВГ-звездам, по-прежнему увеличивая относительные содержания s -элементов в следующих поколениях звезд. В итоге отношения $[s/Fe]$ в молодых звездах - цефеидах - могли оказаться завышенными. Но параллельность зависимостей $[s/Fe]$ от $[Fe/H]$ цефеид и гигантов свидетельствует, что основным поставщиком этих элементов остаются АВГ-звезды, у которых в выходе отношения $[s/Fe]$ зависят от их металличности. Эта зависимость объясняет и увеличение относительных содержаний s -элементов у цефеид с ростом галактоцентрического расстояния, т. е. с уменьшением металличности.

Естественно, что высказанные предположения могут быть справедливыми только в случае, если обсуждаемые различия между относительными содержаниями различных химических элементов в цефеидах, карликах и красных гигантах не обусловлены невыявленными систематическими ошибками в определениях этих содержаний в цефеидах. В противном случае следует пересмотреть подход к определению содержаний химических элементов в эволюционно продвинутых звездах – цефеидах. Для проверки выводов желательно исследовать поведение содержаний тех же элементов в столь же молодых, как и цефеиды, рассеянных звездных скоплениях.

Заключение

В заключение перечислим основные результаты работы.

Исследованы, зависимости параметров эллипсоидов скоростей F–G-звезд тонкого диска Галактики от возраста и металличности, прослежено влияние радиальной миграции звезд на зависимости от возраста параметров эллипсоидов, построены и исследованы диаграммы «возраст – металличность» и «возраст – относительное содержание магния». Кроме того проведен сравнительный анализ содержаний химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза, в очень молодых звездах — цефеидах, и более старых карликах и гигантах поля.

Показано, что зависимости от возраста величин большой, средней и малой полуосей эллипсоидов, подчиняются степенному закону с показателями степени, соответственно, 0.26, 0.32 и 0.07 (при неопределенностях ± 0.03). Таким образом величины показателей степени для большой и средней полуосей остаются вполне объясняемыми релаксационными процессами, связанными со стохастическими спиральными волнами плотности (см. Simone et al. (2004)). Получившаяся в данной работе весьма малая величина показателя степени для дисперсии скоростей перпендикулярной к галактической плоскости, теперь дает возможность предположить, что и для этой компоненты актуальным может оказаться «разогревание» только спиральными волнами плотности. Напомним, что для объяснения ранее получаемой большей величины этого показателя необходимо было привлечение «разогревания» звезд гигантскими молекулярными облаками (Hanninen, Flynn (2002)) или даже скоплениями темной материи от распавшихся галактик-спутников под действием приливных сил нашей Галактики (Benson et al. (2013)).

Продемонстрировано, что именно радиальная миграция совместно с отрицательным градиентом металличности в тонком диске ответственна за наблюдаемую для близких звезд отрицательную корреляцию между их металличностью и угловым моментом, тогда как у звезд, рожденных на одинаковых галактоцентрических расстояниях, угловой момент не зависит ни от возраста, ни от металличности.

По звездам, рожденным на солнечном галактоцентрическом расстоянии, показано, что компоненты скорости Солнца относительно местного стандарта покоя равны $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot})_{LSR} = (5.1 \pm 0.4, 7.9 \pm 0.5, 7.7 \pm 0.2)$ км с⁻¹. При этом обе координаты апекса солнечного движения все время остаются в пределах ошибок равными $\langle l_{\odot} \rangle = 70^{\circ} \pm 7^{\circ}$ и $\langle b_{\odot} \rangle = 41^{\circ} \pm 2^{\circ}$.

Продемонстрировано, что радиальная миграция звезд не приводит к значимому искажению хода зависимости металличности от возраста. Показано, что первые несколько миллиардов лет формирования тонкого диска межзвездное вещество в нем было в среднем довольно богато тяжелыми элементами ($\langle [Fe/H] \rangle \approx -0.2$) и плохо перемешано, но с возрастом дисперсия металличности непрерывно уменьшалась от $[Fe/H] \approx 0.22$ до ≈ 0.13 . Все это время среднее относительное содержание магния было несколько выше солнечного ($\langle [Mg/Fe] \rangle \approx 0.1$). Примерно 4 – 5 млрд. лет назад средняя металличность стала систематически увеличиваться, сохраняя неизменной дисперсию, а вслед за этим среднее относительное содержание магния начало уменьшаться. Одновременно, численность звезд в подсистеме резко увеличилась. Перечисленные свойства можно объяснить тем, что низкая на начальных этапах формирования тонкого галактического диска скорость звездообразования внезапно увеличилась около 4 – 5 млрд. лет назад.

Обнаружено, что относительные содержания всех элементов в цефеидах от скорости не зависят, но увеличиваются с увеличением галактоцентрического расстояния и уменьшаются с увеличением металличности как и у карликов и гигантов тонкого диска. Однако у цефеид зависимость $\langle [\alpha/Fe] - [Fe/H] \rangle$ лежит ниже, а зависимости $\langle [r/Fe] - [Fe/H] \rangle$ и $\langle [s/Fe] - [Fe/H] \rangle$ - выше, чем аналогичные последовательности у карликов и гигантов. Выдвинуто предположение, что после достижения в межзвездной среде тонкого диска примерно солнечной металличности самые массивные звезды перестали вспыхивать как сверхновые второго типа, которые в основном и обогащали межзвездную среду α -элементами. В итоге в следующих поколениях звезд образовался дефицит относительных содержаний α -элементов, а также небольшой избыток элементов r -процесса, которые выбрасываются в межзвездную среду менее массивными ($8 - 10 M_{\odot}$) сверхновыми второго типа. Избыток в цефеидах элементов s -процесса можно объяснить тем, что часть s -элементов производилась в слабом компоненте s -процесса в недрах массивных звезд, которые, возможно, и без взрыва могут сбрасывать верхние части своих оболочек

подобно АВГ-звездам. Поскольку же такие массивные звезды, взрываясь как SNe II, обогащали межзвездную среду также и значительным количеством атомов железа, то при их отсутствии отношения $[s/Fe]$ (как и $[r/Fe]$) у следующих поколений звезд должны получиться выше.

Литература

- Бобылев В.В.//2004, Письма в Астрон. Журн., т.31, с.185
- Бобылев В.В., Байкова А.Т.// 2007, Астрон. Журн. т.84, с.418
- Боркова Т.В., Марсаков В.А.// 2005, Астрон. Журн. т.82, с.453
- Гожа М.Л., Боркова Т.В., Марсаков В.А.// 2012, Письма в Астрон. журн., т.38, с.571
- Гожа М.Л., Коваль В.В., Марсаков В.А.// 2012, Письма в Астрон. журн., т.38, с.584
- Гожа М.Л., Марсаков В.А.,// 2013, Письма в Астрон. журн. v.39, p.19
- Ефремов Ю.Н.// 2003, Астрон. журн. т.80. с.1086.
- Коротин С.А.// 2009, Астрон. журн. v.86, p.702
- Марсаков В.А., Сучков А.А.// 1977, Астрон. журн., т.54, с.1232
- Марсаков В.А., Сучков А.А.// 1980, Астрон. журн., т.57, с.53
- Marsakov V.A., Suchkov A.A., Shevelev Yu.G.// 1990, Astrophys. Sp. Sci. v.172, p.51
- Марсаков В.А., Боркова Т.В.// 2005, Письма в Астрон. Журн. т.31, с.577
- Марсаков В.А., Боркова Т.В.// 2006, Письма в Астрон. Журн. т.32, с.419
- Мишенина Т.В., Горбанева Т.И., Бьенейме О., Субиран К., Ковтюх В.В., Орлова Л.Ф.// 2007, Астрон. журн., т.84, с.1
- Огородников К.Ф.//1958, Динамика звездных систем. М.: Изд. физ.-мат. лит. С.84

- Паренаго П. П.//1951, Труды ГАИШ, т.20, с.26
- Шевелев Ю.Г., Марсаков В.А.// 1995, Астрон. журн., т.72, с.321
- Andrievsky S.M., Lepine J.R.D., Korotin S.A. et al.// 2013, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.428. p.3252.
- Antoja T., Figueras F., Fernandez D., Torra J.// 2008, Astron. and Astrophys. v.490, p.135
- Assian R., Figueras F., Tjrra J., Chen B.//1999, Astron. Astrophys. v.341, p.427
- Acharova I.A., Lepine J.R.D., Mishurov Yu.N., et al.//2010 Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.402, p.1149 .
- Acharova I.A., Mishurov Yu.N., Kovtyukh V.V.// 2012, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.420, p.1590.
- Babysiaux C., Gilmor G.// 2005, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.358, p.1309
- Bensby T., Feltzing S., Lundstrom I.// 2003, Astron. Astrophys., v.410, p.527
- Bensby T., Feltzing S., Lundstrom I.// 2007, Astron. Astrophys., v.655, p.89
- Benson A.J., Lasey C.G., Frenk C.S., et al.// 2004, MNRAS v.351, p.1215
- Berdnikov L.N., Rastorguev A.S., Dambis A.K., et al., A catalogue of data on Galactic Cepheids (2003), <http://www.sai.msu.su/groups/cluster/CEP/RADVEL/>
- Binney J., Dehgen W., Bertelli G.// 2000, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.318, p.658
- Bisterzo S., Gallino R., Straniero O., et al.// 2001, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.418, p.284
- Buser R., Rong J., Karaali S.// 1999, Astron. Astrophys. v.348, p.98
- Chakrabarty D.// 2008, astoro-ph/0703242, Astron. Astrophys.

- Chereul E., Creze M., Bienayme O.// 1999, *Astron. Astrophys, Sup. Ser.*, v.135, p.5
- Chiappini C., Matteucci F., Gratton R.G.// 1997, *Astrophys. J.*, v.477, p.765
- Demarque P., Woo J.-H., Kim Y.-C., Yi S.K.// 2004, *Astrophys. J. Suppl.* v.155, p.667
- Dehnen W., Binney// 1998, *Mon.Not. Roy. Astron. Soc.* v.298, p.387
- Dehnen W., Binney// 1999, *Astrophys. J.* v.524, p.35.
- Dehnen W.// 2000, *Astron. J.* v.119, p.800
- Edvardsson B., Andersen J., Gustafsson B. et al.// 1993, *Astron. Astrophys.*, v.275, p.101
- Famaey B., Jorissen A., Luri X. et al.// 2005, *Astron. Astrophys.* v.430, p.165
- Fuchs B., Dettbarn C., Jahrei H., Wielen R.)// 2001, *Dynamics of star clusters and Milky Way*, ASP Conf. Ser., v.228, p.235, eds. S. Deiters, B.Fuchs, A.Just, R.Spurzem, R.Wielen
- Feldzing S., Holmberg J., and Hurley J.R.// 2001, *Astron. And Astrophys.* v.377, p.911
- Flynn C., Sommer-Larsen J., Christensen P.R.// 1996, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* v.281, p.1027
- Fux R.//2001, *Astron. Astrophys.* v.373, p.511
- Fuhrmann K.// 2000, *The First Stars. Proc. MPA/ESO Workshop*, Weiss A., Abel T.G., Hill V. (eds), Springer, p.68
- Gallino R., Arlandini C., Busso M., et al.// 1998, *Astrophys. J.* v.497, p.388
- Gilmore G., Wyse R.F.G., in *The Galaxy* (ed. Gilmore G. , Carswell B. , NATO ASI Ser. C. 207, Dordrecht: Reidel)// 1987, 247
- Girardi L., Bressan A., Chiosi C. et al.// 2000, *Astron. Astrophys. S.* v.141, p.371

- Grenon M.// 1972 in: Age des Etoiles, Proceedings of IAU Colloq. v.17, Paris, France tds. G. Caurel de Strobel, Delpface A.M., p.55
- Grenon M.// 1987, Journal of Astrophysics and Astronomy, v.8, p.123
- Hanninen J., Flynn C.// 2002, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. v.337, p.731
- Haywood M.// 2002, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. v.337. p.151
- Haywood M.// 2006, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. v.371, p.1760
- Haywood M.// 2008, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.388, p.1175
- Helmi A., Navarro J.F., Norstrom B. et al.// 2006, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.365, p.1309
- Holmberg J., Nordstrom B., Andersen J.// 2007, Astron. Astrophys. 475, 519
- Holmberg J., Nordstrom B., and Andersen J.// 2009, Astron. and Astrophys. v.501, p.941
- Jorgensen B.R., Lingren L.// 2005, Astron. Astrophys. v.436, p.127
- Karatas Y., Bilir S. and Shuster W.J.// 2005, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.360, p.1345
- Kovtyukh V.V., Wallerstein G., Andrievsky S.M.// 2005, PASP v.117, p.1173
- Kochanek C.S., Beacom J.F., Kistler M.D., et al.// 2008, Astrophys. J., v.684, p.1336
- Cristallo S., Straniero O., Gallino R., et al.// 2009, Astrophys. J., v.696, p.797 (2009).
- Kurucz R. L.//1993, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s Grid, CD-ROMNo. p.13
- Kusakabe M., Iwamoto N., Nomoto K.// 2011, Astrophys. J. v.726, p.25
- Luck R.E., Andrievsky S.M., Fokin S.M., et al.// 2008, Astrophys. J. v.136, p.98
- Luck R.E., Andrievsky S.M., Kovtyukh V.V., et al.// 2011, Astron. Astrophys. v.142, p.51

- Lepin J.R.D., Cruz P., Scariano S., et al.// 2011, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.417, p.698
- Matteucci F., Greggio I.// 1986, Astron. Astrophys., v.154, p.279
- Matteucci F.// 2001, in «The Chemical Evolution of the Galaxy», Astrophys. and Spase Sci. Library 253, Kluwer Acad. Publ.
- Mishenina T.V., Bienayme O., Gorbaneva T.I. et al.// 2006, Astron. and Astrophys. v.456, p.1109
- Mishenina T.V., Pignatary M., Korotin S.A., et al.// 2013, Astron. and Astrophys. v.552A, p.128M
- Nordstrom B., Mayor M., Andersen J., et al.// 2004, Astron. Astrophys., v.418, p.989
- Pignatari M., Gallino R., Heil M., et al.// 2010, Astrophys. J., v.710, p.1557
- Pont F. and Eyer L.// 2004, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.351, p.487 (2004).
- Reddy B.E., Lambert D.L., Allende Prieto C.// 2006, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. v.367, p.1329
- Reid N., Turner E.L., Turnbull M.C.// 2007, Astrophys. J., v.665, p.767
- Roskar R., Debattista V.P., Quinn T.R., Stinson G.S. and Wadsley J.// 2009, The Galaxy Disk in Cosmological Context, Proc. IAU Symp., 254, Edited by J. Andersen, J. Bland-Hawthorn and Nordstrom B., Cambridge: Cambridge University Press, p.64
- Rocha-Pinto H.J., Maciel W.J., Scalo J., Flynn C.// 2000, Astron. Astrophys. v.358, p.850
- Rocha-Pinto H.J., Flynn C., Scalo J., et al.// 2004, Astron. Astrophys. v.423, p.517
- Rocha-Pinto H.J., Rangel R.H.O., Porto de Mello G.F., et al.// 2006, Astron. and Astrophys. v.453, p.9
- Salasnich B., Girardi L., Weiss A. et al.// 2000, Astron. Astrophys. v.361, p.1023

- Schonrich R., Binney J., and Dehnen W.// 2010, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.403, p.1829
- Schuster W.J., Beers T.C., Michel R. et al.// 2004, Astron. And Astrophys. v.422, p.527.
- Simone R.S.De, Wu X., Tremaine S.//2004, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.350, p.627
- Seabroke G.M., Gilmore G.// 2007, Mon. Not. Rou. Astron. Soc. v.380, p.1348
- Serminato A., Gallino R., Travaglio C., et al.// 2009, PASA, v.6, p.153
- Sivia D.S.// 1996, Data analysis: A Bayesian tutorial, Oxford, Clarendon Press
- Smartt S.J., Eldridge J.J., Crockett R.M., Maund J.R.//2009, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.395, p.1409
- Stromgren B.// 1984, Observatory and Astrophys. Lab. Univ. Helsinki Rep. v.6, p.7
- Suchkov A.A.// 2000, Astrophys. J. v.535, p.107
- Takeda Y.// 2007, Publ. Astron. Soc. Jap. v.59, p.335
- Twarog B.A.// 1980, Astrophys. J. v.242, p.242
- Thielemann F.-K., Arcones A., Kappeli R., et al.// 2011, Progress in Particle and Nuclear Physics, v.66, p.346
- Thielemann F.-K., Nomoto K., Yokoi K.//1986, Astron. and Astrophys. v.158, p.17
- Timmes F.X., Woosley S.E., Weaver T.A.// 1995, Astrophys. J. S. v.98, p.617
- Travaglio C., Galli D., Gallino R., et al.// 1999, Astrophys. J. v.521, p.691
- Travaglio C., GallinoR., Arnone E., et al.// 2004, Astrophys. J., v.601, p.864
- Travaglio C. , Ropke F.K., Gallino R., Hillebrandt W.// 2011, Astrophys. J. v.739, p.93

Tsujimoto T., Nomoto K., Yoshii Y. et al.// 1995, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. v.277, p.945

Wallerstein G. , Jacobsen Th.S. , Cottrell P.L., Clark M., Albrow M.// 1992, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. v.259, p.474

Woosley S.E. , Wilson J.R. , Mathews G.J., et al.// 1994, Astrophys. J. v.433, p.229

Yoshii Y., Tsujimoto T., and Nomoto K.// 1996, Astrophys. J. v.462, p.266