

На правах рукописи



Ткаченко Роман Валерьевич

**ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ
ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИСКА**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель: **Мишуров Юрий Николаевич**,
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Засов Анатолий Владимирович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий отделом Внегалактической
астрономии, МГУ им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт имени
П.К. Штернберга, г. Москва.

Хоперсков Александр Валентинович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой Информационных систем и
компьютерного моделирования, ФГАОУ ВО
«Волгоградский государственный Университет»,
г. Волгоград.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Главная (Пулковская)
астрономическая обсерватория Российской
академии наук» (ГАО РАН), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 14 сентября 2020 года в 13 час. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д 002.280.01 на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук
по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д.48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии РАН и
на сайте <http://www.inasan.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.280.01, к.ф.-м.н.

Н. В. Чупина

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Исследования химического состава звезд и межзвездного газа играют исключительную роль в понимании эволюции галактик. Известно, что тяжелые элементы не могли быть синтезированы в период космологического нуклеосинтеза. Но они могли быть произведены уже на галактической стадии. В основе химической эволюции галактики лежат термоядерные реакции, протекающие в звездах либо в процессе их эволюции, либо во время взрывов, когда вещество звезды выбрасывается в межзвездную среду, будучи уже обогащенным вновь синтезированными химическими элементами. А это означает, что содержание тяжелых элементов в межзвездной среде и во вновь рождающихся звездах должно монотонно возрастать со временем. Поэтому относительное содержание химических элементов может служить индикатором возраста, подразумевая, что бедные металлами звезды в среднем относительно старше, чем богатые металлами. Знания о химическом составе позволяют судить не только о возрастах, но и физических свойствах межзвездного вещества (хорошо известно, что наличие даже небольшого количества тяжёлых элементов увеличивает скорость охлаждения межзвёздного газа, т.е. стимулирует звездообразование). Тем самым химическая эволюция галактик оказывается тесно связанной с их историей звездообразования.

Стоит отметить, что ввиду развития наблюдательной техники, измеряют не только общую металличность (“металлами” в астрофизике принято называть относительную концентрацию элементов тяжелее водорода и гелия), но и детальный химический состав. Соответственно, и от современной теории химической эволюции галактик теперь уже требуются сценарии, объясняющие не только общую (среднюю) металличность, но и соотношение содержаний отдельных химических элементов на каждом этапе эволюции галактик.

Отличительной особенностью исследования содержания различных элементов в нашей Галактике является то, что есть возможность измерить химический состав отдельных звезд, причем как в локальной солнечной окрестности, так и на достаточно далеких расстояниях от нее. Изучению химической эволюции нашей Галактики и посвящена настоящая диссертация.

Остановимся вкратце на основных этапах развития представлений о химической эволюции Млечного пути. Первые исследования в этой области были посвящены изучению объектов в непосредственной близости к Солнцу. Следовательно, и первые теории химической эволюции были направлены на объяснение того, как эволюционирует солнечная окрестность. В работах тех лет (например, [1,2,3] и др.), посвященных этой теме, были раскрыты возможности указанного направления исследований в изучении истории звездообразования и обогащения Галактики тяжелыми элементами. Поскольку в качестве наблюдательного материала в цитированных статьях использовались маломассивные звезды в близкой окрестности Солнца, то результатом обработки наблюдательных данных явилось среднее содержание металлов в солнечной окрестности и распределение звезд по металличности.

С целью объяснения указанных данных была разработана так называемая “закрытая” (closed-box) модель химической эволюции галактик, суть которой состояла в том, что, например, галактический диск формировался из вещества, которое однажды (10 – 13 млрд. лет назад) быстро выпало в область будущего диска галактики. Из этого вещества впоследствии формировались звезды, часть которых достаточно быстро эволюционировала (очевидно, это были массивные звезды) и заканчивала свою жизнь сбросом планетарных туманностей или взрывом сверхновых, тем самым обогащая окружающий межзвездный газ тяжелыми элементами.

Однако уже на ранних этапах развития этой теории возникла проблема нехватки бедных металлами звезд в наблюдениях, по сравнению с тем ко-

личеством, что предписывали модели тех лет. Впоследствии она была названа проблемой «G – карликов». С целью улучшения согласия теории с наблюдениями был предложен целый ряд возможных усовершенствований теоретических моделей (например, [4, 5, 6] и др.).

Отметим также, что в работах того времени солнечная окрестность рассматривалась как типичная, и химический состав в этой «точке» ассоциировался со всей Галактикой в целом, хотя уже тогда было понятно, что он может в значительной мере изменяться с Галактическим радиусом.

На следующем этапе произошло открытие изменяющегося с галактическим расстоянием химического состава. Сначала такая информация стала доступна для соседних галактик [7]. В последующем радиальные градиенты химического состава были получены для нашей Галактики по зонам III [8,9], из наблюдений по планетарным туманностям [10], рассеянным скоплениям [11] и цефеидам [12,13]. Теоретические исследования на этом этапе ознаменовались работой [14]. В ней, используя подход [5], они уже явно стали рассматривать все входящие в уравнения величины не только как функции времени, но и как функции галактического радиуса. Кроме того, попытки объяснения радиального градиента химического состава были сделаны и в рамках “однозонного” подхода [15].

Заключительным этапом можно назвать открытие разного рода особенностей в распределении химических элементов вдоль галактического радиуса, например, в работе [16] был получен провал в радиальном распределении кислорода по O-B звездам. Впоследствии этот вывод был подкреплён и другими наблюдениями [17].

Вскоре появились обширные спектроскопические данные о содержании химических элементов по цефеидам, которые показали, что распределение тяжелых элементов является бимодальным с достаточно крутым градиентом внутри солнечного круга и пологим плато во внешней части галактики

[18,19,20,21]. Совсем недавно были опубликованы новые, наиболее точные и полные (как по числу наблюдаемых спектральных линий, так и по количеству звезд) данные о содержании кислорода [22,23,24,25] и железа [26,27,28] в цефеидах, охватывающие большой диапазон радиусов (от 5 до 15 кпк) Галактического диска.

Стоит сказать несколько слов о том, почему столько внимания уделяется цефеидам. Дело в том, что они являются массивными яркими звездами, видимыми на больших, хорошо определяемых расстояниях. Будучи молодыми звездами (~ 100 млн. лет), цефеиды не удаляются далеко от места своего рождения. Таким образом, они дают информацию о содержании химических элементов в настоящий момент времени примерно в тех местах, где они и наблюдаются, что очень важно для теоретического моделирования эволюции содержания тяжелых элементов в диске.

Оказалось, что полученные по цефеидам распределения кислорода и железа демонстрируют нетривиальное поведение, которое не удастся описать простой линейной функцией. Они имеют достаточно крутые отрицательные градиенты во внутренней области диска, перегиб и протяженное плато вблизи солнечной окрестности, а также отрицательные градиенты во внешней области диска.

Целью настоящей диссертации является исследование указанных особенностей в распределениях кислорода и железа вдоль Галактического диска, используя новейшие спектроскопические исследования о содержании этих элементов в цефеидах. При этом ключевое внимание уделяется влиянию спиральных рукавов (в частности, коротационному резонансу, см. ниже) на процессы звездообразования и обогащения диска тяжелыми элементами.

Остановимся подробнее на кислороде. Этот элемент был выбран потому, что основным его источником являются сверхновые 2-го типа (будем обозначать их SN II; в настоящей работе к ним отнесены и сверхновые Ib/c). Предшеству-

никами СН II являются массивные молодые звезды, локализующиеся в спиральной рукавах Галактического диска [29]. Из этого следует, что кислород может быть чистым индикатором влияния спиральной структуры на обогащение диска.

В настоящей диссертации усовершенствуется модель формирования радиального распределения кислорода вдоль диска, предложенная в ряде работ [30,31,32] и обобщенная в работе [33]. В них формирование обсуждаемых особенностей в радиальном распределении связано с комбинированным влиянием коротационного резонанса и турбулентной диффузии тяжелых элементов. Дело в том, что согласно теории галактических волн плотности в окрестности коротационного резонанса скорость звездообразования (далее СЗО) должна уменьшаться (формально, на коротационном резонансе $СЗО \rightarrow 0$). Следовательно, если химический элемент производится короткоживущими объектами (например, коллапсирующими СН II), которые в течение своей жизни не могут уйти далеко от места своего рождения в радиальных направлениях, то распределение химического элемента должно демонстрировать провал вблизи коротации. Этот провал затем сглаживается, приводя к распределению металличности в виде плато в окрестности коротационного резонанса.

Стоит отметить, что в работах по химической эволюции коротационный эффект и его влияние на процессы звездообразования и обогащения диска химическими элементами учитывались и в более ранних работах, например, [14,34,35]. Но авторы этих работ использовали модель [36], согласно которой коротация находится на краю диска. Как следствие, ожидать проявления коротации в таких моделях вблизи солнечной окрестности не приходилось.

В настоящей диссертации используется модель волнового узора, согласно которой коротационный резонанс располагается вблизи Солнца [4,37,38,39]. Близость указанного плато в радиальном распределении кислорода (и железа) к

положению Солнца в Галактике и наталкивает на идею о том, что коротационный резонанс может повлиять на формирование плато.

Кроме того, рассматриваемые в диссертации методы, позволяют оценить средние массы кислорода, выбрасываемые в расчете на одну вспышку СН II. Это в свою очередь дает возможность ограничить предельные массы предшественников СН II и допустимый класс моделей формирования диска.

Помимо крупномасштабной особенности в распределении кислорода, наблюдаются также локальные особенности – провалы в содержании кислорода (шириной ~ 1 кпк). В настоящей работе такие провалы отождествляются с падением (“локальными потоками”) межгалактического низкометаллического газа ($\sim 0.2 Z_{\odot}$) на галактический диск в течение последних ~ 100 млн лет. Описанный в работе статистический метод позволяет оценить массы предполагаемых потоков, необходимые для объяснения наблюдаемых особенностей.

Переходя к железу, стоит отметить, что оно имеет в своём распределении крупномасштабную особенность, очень похожую на ту, что обнаружена для кислорода – перегиб и плато в той же области галактических расстояний, что и кислород. На первый взгляд вышеупомянутое сходство в распределениях кислорода и железа является неожиданным, поскольку обсуждаемые химические элементы производятся источниками, имеющими различную природу: кислород поставляется в Галактику только очень молодыми СН II [40], тогда как, помимо СН II, значительная часть галактического железа ($\sim 2/3$, согласно [41]) выбрасывается сверхновыми типа Ia (СН Ia). Поскольку долгое время считалось, что прародители СН Ia являются долгоживущими объектами (~ 1 млрд. лет и более), было трудно объяснить происхождение плато в радиальном распределении железа по аналогии с кислородом. Дело в том, что если прародители СН Ia являются долгоживущими объектами, то они будут рассеяны по большей части диска под влиянием галактических спиральных рукавов [42]. Следовательно, в момент выброса железа в окружающую межзвездную среду сверхновой Ia,

прародители которой рождаются вблизи коротационного резонанса, могут находиться далеко от места, где они родились. В этом случае особенность в радиальном распределении железа (подобную кислороду) было бы невозможно объяснить с помощью эффекта коротационного резонансного.

Однако после появления работ [43,44,45,46] было признано, что СН Ia разделяются на два подтипа: короткоживущие (локализующиеся строго в спиральных рукавах) и долгоживущие СН Ia (они были названы “prompt” и “tardy” соответственно; возможные сценарии для этих подтипов будут кратко описаны в параграфе 3.2). Это открытие дает возможность использовать подход, предложенный ранее в [33] и усовершенствованный в настоящей работе, позволяющий объяснить обсуждаемую особенность в радиальном распределении железа, а также оценить вклады всех источников в обогащение Галактики железом.

В настоящей диссертации рассматривается также проблема “G – карликов” – избыточного количества низкометаллических звезд, предсказываемых в теориях нуклеосинтеза в солнечной окрестности, по сравнению с их наблюдаемым количеством. Основная идея состоит в том, что анализируя крупномасштабное радиальное распределение кислорода и железа вдоль галактического диска, полученное по молодым ярким звездам – цефеидам, можно одновременно найти параметры (например, временные зависимости металличности и СЗО на солнечном расстоянии), которые позволяют рассчитать распределение звезд малых масс по металличности в близкой к Солнцу окрестности. В определенном смысле такой подход отличается от широко распространенного метода, когда вначале исследуется локальная окрестность, и лишь затем изучаются распределения химических элементов на более далеких расстояниях от Солнца. В настоящей работе анализируются различные варианты решения проблемы G-карликов. Ключевым способом является согласование теоретического распределения маломассивных звезд по массе с наблюдаемым распределением. Хорошо

известно, что наблюдаемые выборки маломассивных звезд в локальной окрестности Солнца содержат порядка 1% звезд от их реального количества (разумеется, речь идет о звездах, для которых выполнены спектральные определения содержания в них железа). Очевидно также, что “потерянными” (в наблюдениях) будут звезды малой светимости. Поэтому в настоящей диссертации предлагается вначале согласовать теоретическое распределение этих звезд с наблюдаемым, и только затем строить теоретическую функцию распределения звезд по металличности. Это согласование достигается путем переопределения звёздной начальной функции масс. С помощью вышеописанного подхода, а также некоторых дополнительных корректировок, описанных в литературе [47], удастся достичь достаточно хорошего согласия теоретической и наблюдаемой функций распределения металличности для маломассивных звезд в локальной солнечной окрестности.

Результаты, выносимые на защиту

1. Разработана численная модель для исследования химической эволюции Млечного пути, направленная на объяснение как крупномасштабного радиального распределения кислорода и железа в диске Галактики, полученного по ярким молодым цефеидам, так и локальной функции распределения металличности в солнечной окрестности, построенной по звездам - карликам.
2. С помощью разработанных моделей дана интерпретация нелинейных радиальных обилий кислорода и железа вдоль галактического диска, полученных с использованием цефеид. Показано, что такие распределения указанных элементов связаны с комбинированным влиянием коротационного резонанса (который находится примерно на расстоянии 7 кпк) и турбулентной диффузии элементов в межзвездном газе. При этом в

расчетах использовано новое представление для коэффициента турбулентной диффузии, учитывающее кориолисовы осцилляции.

3. Посредством статистического метода поиска наилучшего соответствия теоретического и наблюдаемого распределений кислорода, а также оценок погрешностей искомых параметров были получены средние массы кислорода, выбрасываемые в расчете на одну вспышку сверхновых 2-го типа. В свою очередь, они позволили оценить предельные массы предшественников сверхновых типа II, которые могут участвовать в химической эволюции Млечного пути.
4. С помощью развитого статистического метода были оценены массы потоков низкометаллического межгалактического газа, необходимые для объяснения наблюдаемых локальных провалов в радиальном распределении кислорода в диске Галактики.
5. В результате исследования крупномасштабного наблюдаемого радиального распределения железа оценены средние массы железа, выбрасываемые в расчете на одну вспышку каждого подтипа сверхновых Ia, а также процентные вклады всех источников в обогащение галактического диска железом.
6. Показано, что модели быстрого формирования галактического диска (~2 млрд лет) лучше согласуются с наблюдаемым радиальным распределением кислорода и железа в диске Галактики, чем модели с длинной временной шкалой или inside-out.
7. Показано, что результаты крупномасштабного моделирования радиальных распределений кислорода и железа, полученных с использованием данных об обилиях по молодым цефеидам, могут быть совместимы с наблюдаемой локальной функцией распределения звезд – карликов (имеющим времена жизни, сравнимые и больше возраста Галактики) по металличности. Это

достигается, в первую очередь, путем выделения из теоретической модели того числа звезд, которое присутствует в наблюдаемой выборке (вообще говоря, малого по сравнению с тем, что должно иметь место в близкой к Солнцу окрестности галактического диска), при этом распределение звезд по массам в модели также должно соответствовать наблюдаемому. Кроме того, для достижения наилучшего соответствия теоретической и наблюдаемой функции распределения металличности использованы также дополнительные поправки, описанные в литературе.

8. Получено уточненное представление для функции времени жизни маломассивных звезд от массы.

Научная новизна

1. Используя новейшие данные о содержании кислорода и железа в цефеидах, построены их уточненные средние радиальные распределения вдоль Галактического диска, которые свидетельствуют об их нелинейном распределении.
2. Разработан новый алгоритм численного моделирования формирования наблюдаемого нелинейного распределения кислорода и железа по галактическому диску. В частности, уточнено представление коэффициента турбулентной диффузии указанных элементов, учитывающее кориолисовы осцилляции. Используя наблюдательные данные для распределения звезд малой массы по возрастам, получено новое выражение, связывающее время жизни маломассивной звезды с ее массой. Согласно этой зависимости, время от рождения Солнца до его финальной стадии составляет примерно 11.4 млрд лет.
3. Предложен новый механизм, объясняющий локальные провалы в наблюдаемом радиальном распределении кислорода. Основная идея

механизма состоит в том, что такие особенности могут образовываться вследствие падения низкометаллического газа на галактический диск от галактик-спутников с характерными временами ~ 100 млн. лет.

4. Предложен новый статистический метод для оценки средних масс выбрасываемого железа в расчете на одну вспышку каждого подтипа сверхновых Ia, а также вклада каждого типа источников железа в обогащение галактического диска.
5. Получены новые оценки предельных масс для предшественников сверхновых типа II, которые хорошо согласуются с наблюдаемыми.
6. Предложен новый подход к решению проблемы “G-карликов”. Основная идея метода заключается в выделении из общего числа звезд – карликов, присутствующих в теоретической модели в окрестности Солнца, такого их количества, которое соответствует числу звезд в наблюдаемых выборках, при этом в выделенной теоретической подвыборке звезд их распределение по массам также должно соответствовать наблюдаемому распределению. Эта процедура выполняется с помощью модификации начальной функции звездных масс. С учетом предложенных ранее в литературе корректирующих факторов удастся достичь хорошего согласования теории с наблюдениями.

Научная и практическая значимость

Полученные в диссертации результаты важны для понимания физики химической эволюции Галактического диска. Проведенные исследования также важны для объяснения наблюдаемых особенностей в распределении кислорода и железа в диске и функции распределения маломассивных звезд по металличности. Объяснение таких особенностей может значительно ограничить количество допустимых моделей эволюции галактик.

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в постановке задач, статистической обработке наблюдательных данных, создании численных моделей, проведении численных расчетов, анализе результатов моделирования, обсуждении и подготовке к публикации полученных результатов. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором в результате совместных исследований с доктором физико-математических наук, профессором Мишуровым Ю.Н.

Достоверность представленных результатов

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов исследования химической эволюции Галактического диска обеспечивается применением хорошо обоснованных теоретических моделей, устойчивостью и сходимостью использованных разностных схем, сравнением с имеющимися данными наблюдений и обсуждением полученных результатов на конференциях и семинарах. Основные результаты опубликованы в авторитетных международных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, были представлены в качестве устных и стендовых докладов:

- на международной конференции:
 - «XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry, Symposium- The Periodic Table through Space and Time» (Санкт-Петербург, Россия, 2019 г.)
- на всероссийских конференциях:
 - «ВАК-2017 Астрономия: познание без границ» (Ялта, Крым, 2017 г.)
 - «VII Пулковская молодежная астрономическая конференция» (Санкт-Петербург, Россия, 2018 г.)

- «Современная звездная астрономия — 2018» (Москва, 2018 г.)
- «Современная звездная астрономия — 2019» (Нижний Архыз, 2019 г.)
- на региональных конференциях:
 - «Ежегодная научная конференция молодых ученых ЮНЦ РАН» (Ростов-на-Дону, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.)
- на конференциях Южного федерального университета:
 - «Студенческая научная конференция Физического факультета ЮФУ» (Ростов-на-Дону, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.)

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] Mishurov Y. N., **Tkachenko R. V.** On the radial oxygen distribution in the Galactic disc // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – Т. 473. – №. 3. – С. 3700-3709.
- [A2] Mishurov Y. N., **Tkachenko R. V.** On the radial oxygen distribution in the Galactic disc–II. Effects of local streams // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – Т. 476. – №. 4. – С. 5377-5381.
- [A3] Mishurov Y. N., **Tkachenko R. V.** On the radial iron distribution in the Galactic disc // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2019. – Т. 485. – №. 2. – С. 2225-2234.
- [A4] Mishurov Y. N., **Tkachenko R. V.** Local Metallicity Distribution Function Derived from Galactic Large-scale Radial Iron Pattern Modeling // The Astrophysical Journal. – 2019. – Т. 887. – №. 2. – С. 238.

Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] Mishurov Y. N., **Tkachenko R. V.** Features of Chemical Evolution in the Galactic Disc //Modern Star Astronomy. Vol. 1, Astronomy-2018 (XIII Congress of the International Public Organization "Astronomical Society"). Conference Abstracts, Moscow: IZMIRAN, 2018. p. 247-249. – 2018. – Т. 1. – С. 247-249.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации 132 страницы, включая 21 рисунок, 8 таблиц, 1 приложение и список цитируемой литературы из 133 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во Введении рассматривается актуальность данной работы, а также поставленные задачи, обсуждается научная новизна полученных результатов, и оценивается научная значимость и применимость проведенных исследований.

В Главе 1 “Исследование особенностей распределения кислорода в Галактическом диске” рассматривается распределение кислорода, полученное с использованием новейших спектроскопических наблюдений по цефеидам, демонстрирующее распределение с различными градиентами вдоль галактического радиуса в пределах 5 – 14 кпк. В частности, распределение, переходящее в плато в пределах $7 \leq r \leq 9$ кпк (для солнечного расстояния принимается $r_{\odot} = 7.9$ кпк), где среднее содержание кислорода в цефеидах примерно на 0.15 dex выше, чем на Солнце. В этой главе описываются теоретические модели формирования галактического диска и последующее численное моделирование синтеза кислорода в галактическом диске, которое учитывает совместное влияние коротационного резонанса и турбулентной диффузии на обогащение диска тяжелыми элементами. Как показано в Главе 1, теория лучше всего согласуется с наблюдениями, если временная шкала скорости выпадения газа на диск t_f составляет $\sim 2 - 3$ млрд. лет, тогда как наихудшим является случай, если $t_f = 6$

млрд. лет (последнее означает, что высокая скорость падения газа в настоящую эпоху $\sim 1.5 M_{\odot} \text{год}^{-1}$ не удовлетворяет наблюдаемому радиальному распределению кислорода). Кроме того, для альтернативного сценария "inside-out" необходимы дальнейшие исследования. Используя полученные средние массы вновь синтезированного кислорода, выбрасываемого в расчете на одну вспышку сверхновых второго типа (СН II), и теоретические массы выбрасываемого кислорода, которые требуются для объяснения наблюдаемого распределения кислорода, в работе получены предельные массы m_U звезд, которые могут взрываться как сверхновые и участвовать в химической эволюции Галактики. Полученные оценки показывают, что если $t_f \sim 2$ млрд. лет, то в рамках теоретических моделей выбрасываемого кислорода при учете вращения звезд, предельная масса m_U достигает не более $24 M_{\odot}$, но если $t_f \sim 3$ млрд. лет в моделях как для вращающихся звезд, так и для моделей без вращения звезд, m_U может достигать $40 - 50 M_{\odot}$. Первый тип предельных звездных масс (если $t_f \sim 2$ млрд. лет) хорошо согласуется с наблюдаемыми массами предшественников стандартных СН II [48,49]. Второй тип предельных звездных масс для предшественников СН II, вероятно, позволяет отождествить их с массивными звездами Вольфа-Райе, которые могут являться СН Ib/c.

В Главе 2 “Исследование локальных особенностей в распределении кислорода” анализируется идея о том, что локальные особенности — провалы (шириной ~ 1 кпк), наблюдаемые в радиальном распределении кислорода, связаны с падением межгалактического низкометаллического газа ($\sim 0.2 Z_{\odot}$) на галактический диск в течение последних ~ 100 млн лет. В настоящем исследовании указанные особенности в распределении кислорода называются “локальными потоками”. Полученные массы падающего газа (порядка $\sim 10^8 M_{\odot}$) близки к наблюдаемым, например, в Магеллановом потоке. Такие локальные потоки не изменяют среднюю массу кислорода, выбрасываемого в расчете на одну вспышку

СН II, так что предыдущий вывод о вероятных предельных массах для прародителей сверхновых СН II остается верным.

В Главе 3 “Исследование радиального распределения железа вдоль Галактического диска”, используя новейшие данные спектроскопических наблюдений о содержании железа в цефеидах, получено его радиальное распределение вдоль галактического диска. Рисунок этого распределения демонстрирует извивающееся поведение с плато в окрестностях Солнца, причем эта особенность очень похожа на ту, что получена для кислорода. Эту структура объясняется с помощью комбинированного влияния коротационного резонанса (в моделях он расположен близко к солнечному расстоянию) и турбулентной диффузии. Для этого в настоящей диссертации изучается роль трех источников обогащения железом в диске: сверхновых 2-го типа (СН II), короткоживущих и долгоживущих предшественников сверхновых типа Ia (время жизни которых ≤ 100 млн. лет и ≥ 100 млн. лет соответственно). В рамках представленных моделей также хорошо воспроизводится извивающееся радиальное распределение железа и получаются средние массы железа, выброшенные в расчете на одну вспышку каждого подтипа сверхновых Ia. Согласно численному моделированию, сверхновые типа Ia обеспечивают в общей сложности около 50 – 70% железа галактического диска. Остальная часть железа поставляется сверхновыми СН II.

В Главе 4 “Локальная функция распределения металличности” результаты, полученные в главах 1 и 3, а именно, данные об эволюции скорости звездообразования и содержании железа в близкой окрестности Солнца, используются для анализа распределения металличности долгоживущих звезд малой массы в этой же самой окрестности галактического диска. Помимо описанных в литературе методов согласования теоретических моделей синтеза железа в локальной области с наблюдениями, предлагается вначале согласовать теоретическое распределение маломассивных звезд по массе с наблюдаемым

распределением, что изначально не выполняется, так как наблюдаемое распределение содержит меньше 1% звезд от реального количества объектов. Это согласование достигается путем переопределения начальной функции звездных масс. И только после этого рассчитывается функция распределения металличности звезд малых масс в соответствующей солнечной окрестности. С помощью описанного выше алгоритма удастся достичь достаточно хорошего согласия теоретической и наблюдаемой функций распределения металличности для маломассивных звезд в локальной солнечной окрестности.

В Заключении кратко резюмируются полученные результаты и отмечаются возможные направления дальнейшей работы по теме диссертации.

В Приложении А демонстрируется влияние разбросов цефеид по галактическим радиусам.

Список литературы

1. Van den Bergh S. The frequency of stars with different metal abundances // *The Astronomical Journal*. – 1962. – Т. 67. – С. 486-490.
2. Schmidt M. The Rate of Star Formation. II. The Rate of Formation of Stars of Different Mass // *The Astrophysical Journal*. – 1963. – Т. 137. – С. 758.
3. Talbot Jr R. J., Arnett W. D. The evolution of galaxies. i. formulation and mathematical behavior of the one-zone model // *The Astrophysical Journal*. – 1971. – Т. 170. – С. 409.
4. Марочник Л. С., Сучков А. А. Галактика. – "Наука," Глав. ред. физико-математической лит-ры, 1984.
5. Tinsley B. M. Evolution of the stars and gas in galaxies // *Fundamentals of cosmic physics*. – 1980. – Т. 5. – С. 287-388.
6. Larson R. B. Infall of matter in galaxies // *Nature*. – 1972. – Т. 236. – №. 5340. – С. 21-23.
7. Searle L., Sargent W. L. W. Inferences from the composition of two dwarf blue galaxies // *The Astrophysical Journal*. – 1972. – Т. 173. – С. 25.
8. Peimbert M., Torres-Peimbert S., Rayo J. F. Abundance gradients in the Galaxy derived from H II regions // *The Astrophysical Journal*. – 1978. – Т. 220. – С. 516-524.
9. Vilchez J. M., Esteban C. The chemical composition of H II regions in the outer Galaxy // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1996. – Т. 280. – №. 3. – С. 720-734.
10. Maciel W. J., Costa R. D. D., Uchida M. M. M. An estimate of the time variation of the O/H radial gradient from planetary nebulae // *Astronomy & Astrophysics*. – 2003. – Т. 397. – №. 2. – С. 667-674.

11. Twarog B. A., Ashman K. M., Anthony-Twarog B. J. Some revised observational constraints on the formation and evolution of the Galactic disk // arXiv preprint astro-ph/9709122. – 1997.
12. Caputo F. et al. Pulsational constraints to the metallicity gradient in the Galactic disk // *Astronomy & Astrophysics*. – 2001. – T. 372. – №. 2. – C. 544-550.
13. Harris H. C. Photometric abundances of Type II Cepheid variables // *The Astronomical Journal*. – 1981. – T. 86. – C. 719-729.
14. Lacey C. G., Fall S. M. Chemical evolution of the galactic disk with radial gas flows // *Astrophysical journal*. – 1985. – T. 290. – C. 154-170.
15. Wiebe D. S., Tutukov A. V., Shustov B. M. The radial gradient of heavy-element abundances in disk galaxies // *Astronomy Reports*. – 2001. – T. 45. – №. 11. – C. 854-860.
16. Daflon S., Cunha K. Galactic metallicity gradients derived from a sample of OB stars // *The Astrophysical Journal*. – 2004. – T. 617. – №. 2. – C. 1115.
17. Smartt S. J., Rolleston W. R. J. The galactic oxygen abundance gradient // *The Astrophysical Journal Letters*. – 1997. – T. 481. – №. 1. – C. L47.
18. Andrievsky S. M. et al. Using Cepheids to determine the galactic abundance gradient-II. Towards the galactic center // *Astronomy & Astrophysics*. – 2002. – T. 384. – №. 1. – C. 140-144.
19. Andrievsky S. M. et al. Using Cepheids to determine the galactic abundance gradient-III. First results for the outer disc // *Astronomy & Astrophysics*. – 2002. – T. 392. – №. 2. – C. 491-499.
20. Luck R. E. et al. The galactic abundance gradient from Cepheids-IV. New results for the outer disc // *Astronomy & Astrophysics*. – 2003. – T. 401. – №. 3. – C. 939-949.
21. Andrievsky S. M. et al. The Galactic abundance gradient from Cepheids-V. Transition zone between 10 and 11 kpc // *Astronomy & Astrophysics*. – 2004. – T. 413. – №. 1. – C. 159-172.

22. Luck R. E., Lambert D. L. The distribution of the elements in the Galactic disk. III. A reconsideration of cepheids from $l=30$ to 250 // *The Astronomical Journal*. – 2011. – T. 142. – №. 4. – C. 136.
23. Luck R. E. et al. Oxygen Abundances in Cepheids // *The Astronomical Journal*. – 2013. – T. 146. – №. 1. – C. 18.
24. Martin R. P. et al. Oxygen, α -element and iron abundance distributions in the inner part of the Galactic thin disc // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2015. – T. 449. – №. 4. – C. 4071-4078.
25. Korotin S. A. et al. Oxygen abundance distribution in the Galactic disc // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2014. – T. 444. – №. 4. – C. 3301-3307.
26. Da Silva R. et al. Neutron-capture elements across the Galactic thin disk using Cepheids // *Astronomy & Astrophysics*. – 2016. – T. 586. – C. A125.
27. Genovali K. et al. On the fine structure of the Cepheid metallicity gradient in the Galactic thin disk // *Astronomy & Astrophysics*. – 2014. – T. 566. – C. A37.
28. Genovali K. et al. On the α -element gradients of the Galactic thin disk using Cepheids // *Astronomy & Astrophysics*. – 2015. – T. 580. – C. A17.
29. Aramyan L. S. et al. Supernovae and their host galaxies–IV. The distribution of supernovae relative to spiral arms // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2016. – T. 459. – №. 3. – C. 3130-3143.
30. Acharova I. A. et al. A mechanism for the formation of oxygen and iron bimodal radial distribution in the disc of our Galaxy // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2010. – T. 402. – №. 2. – C. 1149-1155.
31. Acharova I. A., Mishurov Y. N., Rasulova M. R. A new method of corotation radius evaluation in our Galaxy // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. – 2011. – T. 415. – №. 1. – C. L11-L15.

32. Acharova I. A., Mishurov Y. N., Kovtyukh V. V. Galactic restrictions on iron production by various types of supernovae // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2012. – T. 420. – №. 2. – C. 1590-1605.
33. Acharova I. A. et al. Galactic constraints on supernova progenitor models // *Astronomy & Astrophysics*. – 2013. – T. 557. – C. A107.
34. Wyse R. F. G., Silk J. Star formation rates and abundance gradients in disk galaxies // *The Astrophysical Journal*. – 1989. – T. 339. – C. 700-711.
35. Portinari L., Chiosi C. On star formation and chemical evolution in the Galactic disc // arXiv preprint astro-ph/9908326. – 1999.
36. Lin C. C., Shu F. H. On the spiral structure of disk galaxies // *Selected Papers of CC Lin with Commentary: Vol. 1: Fluid Mechanics Vol. 2: Astrophysics*. – 1987. – C. 561-570.
37. Lépine J. R. D. Mishurov Yu. N., Dedikov S. Yu., 2001 // *ApJ*. – T. 546. – C. 234.
38. Bobylev V. V., Bajkova A. T. Determination of galactic rotation parameters and the solar galactocentric distance R_0 from 73 masers // *Astronomy Letters*. – 2014. – T. 40. – №. 7. – C. 389-397.
39. Dias W. S. et al. The spiral pattern rotation speed of the Galaxy and the corotation radius with Gaia DR2 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2019. – T. 486. – №. 4. – C. 5726-5736.
40. Wanajo S. et al. Nucleosynthesis in electron capture supernovae of asymptotic giant branch stars // *The Astrophysical Journal*. – 2009. – T. 695. – №. 1. – C. 208.
41. Matteucci F. Chemical evolution of galaxies and galaxy formation mechanisms // *Baryons in Dark Matter Halos*. – SISSA Medialab, 2004. – T. 14. – C. 072.
42. Mishurov Y. N., Acharova I. A. Is it possible to reveal the lost siblings of the Sun? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2011. – T. 412. – №. 3. – C. 1771-1777.

43. Bartunov O. S., Tsvetkov D. Y., Filimonova I. V. Distribution of supernovae relative to spiral arms and H II regions // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1994. – T. 106. – №. 706. – C. 1276.
44. Greggio L. The rates of type Ia supernovae-I. Analytical formulations // Astronomy & Astrophysics. – 2005. – T. 441. – №. 3. – C. 1055-1078.
45. Mannucci F. et al. The supernova rate per unit mass // Astronomy & Astrophysics. – 2005. – T. 433. – №. 3. – C. 807-814.
46. Mannucci F., Della Valle M., Panagia N. Two populations of progenitors for Type Ia supernovae? // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2006. – T. 370. – №. 2. – C. 773-783.
47. Haywood M. Revisiting two local constraints of the Galactic chemical evolution // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2006. – T. 371. – №. 4. – C. 1760-1776.
48. Smartt S. J. et al. The death of massive stars–I. Observational constraints on the progenitors of Type II-P supernovae // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2009. – T. 395. – №. 3. – C. 1409-1437.
49. Kochanek C. S. et al. A survey about nothing: monitoring a million supergiants for failed supernovae // The Astrophysical Journal. – 2008. – T. 684. – №. 2. – C. 1336.
50. Karapetyan A. G. et al. The impact of spiral density waves on the distribution of supernovae // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – T. 481. – №. 1. – C. 566-577.
51. Asplund M. et al. The chemical composition of the Sun // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2009. – T. 47. – C. 481-522
52. Draper N. R., Smith H. Applied Regression Analysis (Wiley & Sons, New York). – 1981.