РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 524.31.08-355/36:520.35

ЕРМАКОВ Сергей Владимирович

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕР МАЛОМАССИВНЫХ ЗВЕЗД

(01. 03. 02 – астрофизика, радиоастрономия)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Нижний Архыз – 2002

Работа выполнена в Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук В. Е. Панчук
Научный консультант:	доктор физико-математических наук В. Г. Клочкова
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук О. К. Сильченко Государственный астрономический институт им. Штернберга
	кандидат физико-математических наук Г. П. Топильская Ставропольский государственный университет
Ведущая организация:	Ростовский государственный университет

Защита состоится "____"____________ 2002 г. в ____ часов на заседании Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной Астрофизической Обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "____"____________ 2002 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук МАЙОРОВА Е.К.

Общая характеристика работы

В работе представлены научные и научно-технические результаты исследования атмосфер звезд с массами порядка солнечной, по спектрам высокого разрешения, полученным на 6-метровом телескопе БТА. Основное внимание уделено исследованию химического состава атмосфер звезд с дефицитом металлов, где содержание тяжелых элементов в десятки и сотни раз меньше, чем в атмосфере Солнца.

Одной из основных задач, стоящих перед астрофизикой, является исследование химического состава атмосфер звезд, с конечной целью решить вопрос о том, где, как и когда были образованы химические элементы, которые мы наблюдаем в окружающем нас мире.

Согласно современным представлениям, наблюдаемая часть Вселенной была образована в результате Большого Взрыва. В течение нескольких первых минут был образован весь водород и значительная часть наблюдаемого в настоящее время гелия (в пропорции по массе 76 и 24%), а также небольшое количество лития. Примерно через миллиард лет после фазы первичного нуклеосинтеза наступила фаза образования галактик. При этом часть исходного вещества, из которого формировались протогалактические облака, была израсходована на образование первых звезд. Первые звезды (население III) состояли только из трех химических элементов (водород, гелий и литий). Все остальные элементы синтезированы в процессах ядерных реакций на различных стадиях эволюции первых звезд, с последующим выходом части вновь синтезированного вещества в межзвездную среду, перемешиванием его со старым межзвездным веществом, образованием новых поколений звезд, (население II и затем I), повторением в недрах этих звезд процессов синтеза с новым исходным химическим составом. В Галактике наблюдаются звезды населений II (звезды гало) и I (звезды диска), звезды населения III не найдены. Звезды населения I представлены широким спектром масс, у звезд населения II сохранилась маломассивная часть, звезды населения III, по-видимому, не имели маломассивной составляющей, и к настоящему времени проэволюционировали полностью.

Модели химической эволюции Галактики опираются на следующие группы ядерных реакций, эффективно протекающих при существенно различных температурах и плотностях. При достижении в центральных областях сжимающейся звезды температуры порядка 10^7 K, в pp-цепочке или в CNO-цикле начинается синтез ^{4}He из протонов. После того, как водород в ядре звезды практически полностью выгорает, ядро сжимается, нагревается и начинается этап горения гелия в ядре, с продолжением горения водорода в слое вокруг ядра, при этом синтезируются ^{12}C и ^{16}O. После выгорания гелия температура звездного ядра вновь растет, обеспечивая синтез (в реакциях присоединения α-частиц) ядер с четным числом протонов – элементов α-процесса (Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti). При еще более высоких температурах реакции захвата α-частиц находятся в равновесии с реакциями фоторасщепления ядер, в этом равновесном e-процессе происходит синтез элементов группы железа (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni). Более тяжелые элементы синтезируются в реакциях нейтронного захвата, где уже синтезированные ядра элементов железного пика облучаются потоками нейтронов высокой и низкой плотности (r- и s- процессы соответственно). Перечисленные процессы эффективно реализуются в звездах различных масс, разных поколений, и на различных стадиях звездной эволюции.

Хотя каждый элемент может поступать в межзвездную среду из нескольких источников, в общих чертах схема обогащения вещества Галактики химическими элементами выглядит следующим образом. Вещество, частично переработанное в звездах гипотетического населения III, служит исходным материалом для звезд населения II, маломассивную компоненту которого мы наблюдаем в гало. Сверхмассивные звезды населения III являлись основным поставщиком первичных элементов – ядер O, а также относительно небольшого количества C и Fe, и, возможно, элементов r-процесса. Массивные звезды ($M > 10\ M_{\odot}$), заканчивающие эволюцию взрывом сверхновой второго типа (SNeII), выступали как основной поставщик элементов α-процесса, и, в меньшей степени, углерода и элементов группы железа. Основным подтверждением указанной схемы является тот факт, что вещество малометалличных звезд населения II показывает повышенное (относительно железа) содержание O и элементов α-процесса. Кроме этого, при взрывах массивных звезд создаются условия для протекания r-процесса, где могут быть синтезированы тяжелые элементы, в т.ч. и радиоактивные изотопы ^{232}Th, ^{235,238}U. Период полураспада этих изотопов сопоставим с характерным временем эволюции Галактики, поэтому эти изотопы могут быть использованы в методах радиоактивной хронометрии. Звезды с массой $6 - 8\ M_{\odot}$, входящие в состав тесных двойных систем и заканчивающие эволюцию взрывом сверхновой первого типа (SNeIa), являлись основным поставщиком элементов группы железа, а также, возможно, некоторого количества элементов от Ne до Ca. Еще одним важным источником новых элементов являются звезды на стадии асимптотической ветви гигантов (AGB), благодаря которым межзвездная среда получает элементы s-процесса, а также C и N. Протекание s-процесса возможно только при наличии элементов железного пика, т.е., начиная со звезд населения II; синтезируемые при этом элементы называются вторичными. Население II представлено звездами в широком интервале металличностей, причем по мере нарастания дефицита элементов железного пика, дефицит элементов s-процесса нарастает быстрее (т.н. сверхдефицит). Итак, основным экспериментальным подтверждением указанной выше роли различных звезд – вкладчиков в синтез различных элементов, является избыток (относительно кривой распространенности, нормированной на данное содержание железа), элементов α-процесса, и сверхдефицит элементов s-процесса. При нарастании дефицита железа этот эффект выражен сильнее. На кривой распространенности химических элементов наблюдаются и более тонкие эффекты.

Хотя картина образования элементов стала ясна в общих чертах еще со времен первых работ по исследованию химического состава, практическую значимость исследования в этой области приобрели лишь после массового ввода в астрономическую практику новых твердотельных малошумящих приемников – полупроводниковых приборов с зарядовой связью (ПЗС). Именно технология ПЗС позволила расширить область применения спектрографов высокого разрешения на значительное число слабых звезд, среди которых методами фотометрии были выделены звезды со сверхдефицитом металлов. Вслед за применением ПЗС на старых реконструированных спектрографах, разработанных под светоприемники предыдущих поколений, были созданы новые эшелле спектрографы, оптимально приспособленные под формат и линейное разрешение ПЗС. Развитие вычислительной техники позволяет моделировать все этапы спектроскопических наблюдений, включая первые попытки создания полной модели "телескоп - спектрограф - светоприемник - метод обработки". Это, с одной стороны, позволяет определять оптимальный режим наблюдений в каждом конкретном случае, а с другой, – облегчает создание аппаратуры, специализированной для эффективного решения определенного класса задач. Такой вид деятельности спектроскопистов представляется важным, если иметь ввиду массовый (статистический) характер исследований химического состава звезд.

При формировании программы исследования химической эволюции Галактики посредством определения химического состава атмосфер непроэволюционировавших звезд, следует оценить количество звезд данной металличности, доступных в конкретных условиях наблюдений (телескоп, астроклимат, спектрограф, приемник). Число звезд ΔN ярче предельной величины ($\mathrm{V} < \mathrm{V_{lim}}$), в данном интервале металличностей Δ[Fe/H], оценено в приближении модели химической эволюции изолированного объема, в предположении, что уже известны все звезды с дефицитом металлов ярче 10-й величины (Ниссен, 1992). Число звезд в точке поворота в интервалах металличности $-2 >$ [Fe/H] > -3, $-3 >$ [Fe/H] > -4, $-4 >$ [Fe/H] > -5, ярче $\mathrm{V} = 12^{\mathrm{m}}$ оценивается как 200, 20, и 2, соответственно, а для звезд ярче $\mathrm{V} = 11^{\mathrm{m}}$ оценки вчетверо меньше. Эти теоретические оценки хорошо согласуются с данными фотографического обзора с объективной призмой (Бирс и др., 1985). Итак, доля доступных для наблюдений звезд быстро падает с уменьшением металличности. Крайне малометалличные звезды представляют огромный интерес, т.к. они отражают наиболее ранние этапы эволюции Галактики. Поэтому необходимость продвижения спектроскопии в область все более слабых звезд, (т.е. создания все более чувствительной техники наблюдений), очевидна.

В спектрах атмосфер маломассивных холодных звезд количество линий, их интенсивность и эквивалентная ширина, степень блендированности линий, в сильной степени зависят от параметров звездной атмосферы, в том числе и от металличности. При переходе от горячих звезд к спектральным классам F, G и K, средняя величина проекции скорости осевого вращения звезды на луч зрения ($V \sin i$) снижается, что приводит к необходимости получения спектров с более высоким спектральным разрешением. Роль эффектов взаимного блендирования спектральных линий также возрастает, и для поиска неблендированных линий необходимо регистрировать более широкий спектральный интервал. Ширина спектрального диапазона является определяющей и в том случае, когда необходимо получить информацию о линиях максимально большого числа элементов. При переходе к звездам со сверхдефицитом металлов интенсивности линий металлов становятся столь малыми, что для изучения основных характеристик распространенности химических элементов следует наблюдать в синем и ультрафиолетовом диапазонах спектра, где плотность спектральных линий выше, что также означает необходимость наблюдений с высоким разрешением.

Актуальность проблемы

Актуальность **спектроскопических исследований** звезд с массами порядка солнечной, принадлежащих разным типам населения Галактики, обусловлена недостатком информации о химическом составе атмосфер и кинематике этих объектов.

Возросший уровень технологии наблюдений позволяет формулировать и решать ряд задач, из которых в рамках данной работы отметим: а) изучение кривой распространенности химических элементов в космическом веществе разного возраста и генезиса, б) массовое изучение кинематических характеристик звезд разных типов населений, в) исследование макроскопических движений в звездных атмосферах, г) поиск и исследование спектроскопических двойных систем, в т.ч. и с маломассивными спутниками. Эти задачи являются ключевыми в эмпирическом подходе к проблемам эволюции маломассивных звезд, химической эволюции Галактики и синтеза элементов во Вселенной. Поэтому выход на соответствующий методический уровень и последующее выполнение массовых спектроскопических наблюдений холодных звезд представляются актуальными.

Цели и задачи исследования

В процессе выполнения диссертационной работы были поставлены следующие задачи. Во-первых, требовалось выполнить моделирование ряда основных инструментальных эффектов, используя технику расчета синтетических звездных спектров. Во-вторых, необходимо было усовершенствовать ряд алгоритмов работы со спектрами, а в ряде случаев создать новые алгоритмы. В-третьих, требовалось провести исследования используемых спектральных приборов. В-четвертых, следовало выполнить массовые спектральные наблюдения холодных звезд и провести обработку спектров. И, наконец, необходимо было выполнить анализ наблюдательного материала методом моделей атмосфер. Структура диссертации последовательно отражает перечисленные этапы.

Научная новизна

Введенный в строй более четверти века назад, 6-метровый телескоп БТА неоднократно переоснащался светоприемной аппаратурой. Состоялись две смены поколений светоприемников (в частности, в задачах, решаемых в Лаборатории спектроскопии звезд САО РАН, с 1990 года двумерные системы счета фотонов были заменены матрицами приборов зарядовой связи). Под данный тип светоприемников было создано несколько спектрографов, в т.ч. и для исследования звезд с высоким спектральным разрешением на БТА

(Панчук и др., 1998, 1999а, 1999б). Эти работы сопровождались адаптацией существующих алгоритмов, и созданием нового математического обеспечения, необходимого как для исследования спектрографов, так и для обработки наблюдательного материала. Рост вычислительных возможностей позволил распространить нашу деятельность и на задачи моделирования процесса наблюдений, что в итоге привело к экономии наблюдательного времени. Совершенствование инструментальной базы БТА и методов анализа спектров позволило поставить новый тип наблюдательных задач, к числу которых отнесем и задачу статистического исследования холодных звезд разных населений. Спектры этих звезд характерны узкими линиями, что выдвигает определенные требования к спектральному разрешению, а наличие слабых линий в спектрах малометалличных звезд требует применения малошумящих светоприемников. Необходимость исследования содержания многих химических элементов в сочетании с небольшим числом линий в спектрах малометалличных звезд не позволяют применять приближение кривой роста, поэтому в работе был использован метод моделей атмосфер. У самых малометалличных звезд в классическом диапазоне исследования (5000–7000 ÅÅ) практически нет линий металлов, поэтому требовалось технологически освоить диапазон 3500–5000 ÅÅ. Совокупность перечисленных моментов исследования в целом определяет новизну работы.

Впервые в задачах исследования химического состава реализовано высокое сочетание наблюдательных характеристик (число одновременно передаваемых элементов спектра, спектральное разрешение, светосила по потоку), что позволяет исследовать содержание большого числа химических элементов у малометалличных звезд до 12^{m} включительно.

Впервые создан уникальный атлас спектров малометалличных звезд в ультрафиолетовой и синей части спектра с высоким спектральным разрешением (R = 60 000). Это стало возможным в результате ввода на БТА кварцевого эшелле спектрографа НЭС, оснащенного матрицей ПЗС с высокой чувствительностью в коротковолновой области спектра (Uppsala CCD).

Впервые создан атлас спектров F и G звезд различной светимости и металличности (диапазон 4540–6620 ÅÅ, R = 15 000), в совокупности с другими атласами являющийся опорным для исследования пекулярных объектов на БТА.

Впервые исследованы позиционные и фотометрические характеристики эшелле спектрографа главного фокуса БТА, это послужило основой как для выполнения данного исследования, так и для обеспечения других разнообразных наблюдательных программ 6-м телескопа (от спектроскопии комет до спектроскопии квазаров).

Впервые с высокой точностью были получены содержания ряда элементов в атмосфере субкарлика G 251-54, имеющего аномальный (для своей металличности) химический состав. Вещество, из которого была сформирована эта звезда (в отличие от всех остальных наблюдавшихся звезд близкой металличности), не прошло фазу обогащения продуктами нуклеосинтеза, образующимися в результате взрывов сверхновых второго типа (SNeII). Не исключается внегалактическое происхождение этого вещества.

Сочетание моделирования основных моментов разработки и исследования спектральной аппаратуры, с моделированием главных моментов спектроскопических наблюдений, с последующим выполнением большого объема наблюдений холодных звезд на крупном телескопе и анализом результатов на адекватном теоретическом уровне – в рамках отдельной диссертационной работы реализовано впервые.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных в данной работе, подтверждена:

- Совпадением выводов, полученных в результате численного моделирования, и в результате испытания конкретных спектральных приборов.
- Неоднократным получением эшелле спектров для каждой исследованной звезды.
- Сравнением систем эквивалентных ширин, полученных в данной работе и в других опубликованных исследованиях.
- Сравнением фундаментальных характеристик той части звезд программы, которые исследованы другими авторами.
- Высокой внутренней точностью определений содержаний элементов по совокупности спектральных линий.
- Сравнением той части зависимостей "содержание элемента – металличность", для которой имеются опубликованные данные.

Научная и практическая значимость работы

- Практическую ценность имеет спектральный материал высокого качества, полученный для малометалличных слабых объектов.

- Практическую ценность имеют атласы спектров, списки отождествления и параметры линий, составленные в широком спектральном диапазоне.

- Научную значимость представляют определенные в работе фундаментальные параметры звезд: эффективные температуры, светимость, металличность и распространенность химических элементов, а также параметры атмосферной турбуленции.

- Практическую ценность имеют результаты исследования основных характеристик эшелле спектрографа высокого разрешения в главном фокусе 6-м телескопа, позволяющие оптимально организовать подготовку и выполнение значительной части наблюдательных программ, а также сформулировать требования к новой аппаратуре высокого спектрального разрешения в главном фокусе БТА.

- Практическую ценность представляет вывод о возможности выполнения на БТА программы исследования содержания радиоактивных элементов в атмосферах непроэволюционировавших звезд – т.е. реализации метода радиоактивного хронометра.

- Научную значимость представляет вывод о наличии в Галактике старого вещества, имеющего различную историю нуклеосинтеза.

- Научную значимость представляет сравнение содержаний химических элементов, синтезируемых в различных процессах, с кинематическими характеристиками движения звезд в Галактике.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты математического моделирования процесса спектроскопических наблюдений холодных звезд и результаты исследования характеристик эшелле спектрографа главного фокуса 6-метрового телескопа.

2. Результаты спектроскопических наблюдений с высоким спектральным разрешением выборки звезд различной металличности, в широком спектральном диапазоне, в т.ч.: атласы спектров представительных объектов; каталог эквивалентных ширин около 7 000 линий для 38 звезд. Вывод о пригодности полученных УФ спектров для решения задачи радиоактивной хронометрии Галактики.

3. Результаты определения фундаментальных параметров звездных атмосфер и содержаний 29 элементов в атмосферах 38 звезд. Результаты исследования корреляций содержаний элементов, синтезируемых в разных ядерных процессах, с металличностью и кинематическими характеристиками звезд.

4. Результаты исследования субкарлика, в атмосфере которого наблюдается значительный дефицит элементов α-процесса, некоторых элементов железного пика и элементов s-процесса. Вывод о существовании звезд, история формирования которых отличается от основной схемы химической эволюции Галактики.

Апробация результатов

Основные результаты исследования были представлены:

- на семинарах:
  - Лаборатории спектроскопии звезд САО;
  - Специальной астрофизической обсерватории РАН;
  - Кафедры физики космоса Ростовского университета;
  - АО Одесского национального университета, Украина;
  - Национального центра им. Коперника, Торунь, Польша;
  - Шанхайской обсерватории, КНР;
  - Национальных астрономических обсерваторий Академии наук КНР, Пекин;
  - Обсерватории Париж, секция Медон, Франция;
- на международных конференциях:
  - "Магнитные звезды" (САО, 1996);
  - "Звездные атмосферы" (КрАО, Украина, 1997);
  - "Галактическая эволюция" (Париж-Медон, Франция, 1998);
  - "Галактическое гало: от шаровых скоплений до звезд поля" (Льеж, Бельгия, 1999);
  - "Joint European and National Astonomical Meeting" (JENAM, Москва, 2000);

- на региональной научной конференции "Теоретические и прикладные проблемы современной физики" (Ставрополь, 2002).

Всего по результатам диссертации опубликовано 19 работ.

Личный вклад автора

Автору принадлежат:

- Разработка методов моделирования спектроскопических наблюдений,
- Разработка методов исследования спектральной аппаратуры высокого разрешения в главном фокусе 6-метрового телескопа,
- Разработка техники построения атласов звездных спектров, зарегистрированных на эшелле спектрографах с матрицами ПЗС,
- Результаты сравнения химического состава и кинематических характеристик звезд.

Автору принадлежат, равноправно с соавторами:

- Результаты исследования позиционных и фотометрических характеристик эшелле спектрографа высокого разрешения в главном фокусе БТА, и выработка характеристик спектрографа нового поколения,
- Результаты спектроскопических наблюдений выборки малометалличных звезд,
- Результаты определений фундаментальных характеристик звездных атмосфер, выполненных по спектрам 38 исследованных объектов,
- Результаты определения содержания 29 химических элементов в атмосферах 38 маломассивных звезд,
- Вывод о наличии в гало объектов с неклассической историей нуклеосинтеза.

Содержание работы

Работа состоит из Введения, 4-х глав, и Заключения, всего 180 страниц, 67 рисунков, 19 таблиц. Список литературы включает 199 ссылок.

Во Введении дана характеристика центральной задачи – проблемы происхождения химических элементов во Вселенной. Определенное внимание уделено мотивировке выполнения значительного объема аппаратурно-методических исследований.

В первой части диссертации – первых двух главах – рассмотрены соответственно две группы спектроскопических методов – численное моделирование и экспериментальный анализ конкретных технических решений. Еще недавно первая группа методов для ряда исследователей казалась излишеством, отвлекающим от практических проблем астрономической спектроскопии. Поэтому изложение результатов диссертации начинается именно с перечисления возможностей численного моделирования.

В первой главе последовательно изложены основные этапы моделирования процесса регистрации спектров: вычисление синтетического спектра, оценка влияния эффектов уширения (вращение, макротурбуленция, магнитное поле), учет аппаратной функции спектрографа, учет шумов светоприемника, оценки потерь света на элементах спектрографа, моделирование позиционных нестабильностей спектрографа. Показано, что наибольшие резервы спектроскопических наблюдений на БТА заключаются в снижении потерь на оптике спектрографа, снижении потерь на щели, а также в компенсации колебаний телескопа. Рассмотрены преимущества метода кросс-корреляционного определения лучевых скоростей в применении к эшелле спектрографу, оснащенному твердотельным светоприемником. Предложен экспрессный метод поиска магнитных полей в атмосферах звезд, находящихся вблизи главной последовательности. Рассмотрена задача оптимального восстановления основных характеристик звездного спектра: эквивалентных ширин, центральных интенсивностей и положений линий. Показано, что применение процедур восстановления спектра в задачах, связанных с измерением эквивалентных ширин линий, позволяет увеличить проницающую способность метода спектроскопии с высоким разрешением на одну звездную величину.

Во второй главе изложены методы и результаты исследования спектральной аппаратуры, в применении, главным образом, к эшелле спектрографу первичного фокуса БТА (PFES). Предварительно рассмотрена задача выбора характеристик спектрального прибора с целью оптимальной регистрации спектральных линий. Вывод о предпочтительном увеличении спектрального разрешения R, полученный в задаче восстановления профилей линий, подтвержден при рассмотрении вопроса о точности измерения эквивалентных ширин на спектрографах с различным R. Приведены результаты исследования позиционной стабильности спектрографа PFES, разработанные для этого методы использованы при исследовании двух других эшелле спектрографов БТА. Получены экспериментальные кривые проницающей способности и спектральной чувствительности спектрографа PFES, анализируются возможности прибора в задачах детальной спектроскопии слабых объектов. Приведены образцы наблюдений различных объектов (квазаров, туманностей, звезд разных типов). Роль идентичности функции рассеяния точки (PSF) в задачах выделения слабой компоненты сигнала демонстрируется на примере разделения спектров пылевой и газовой составляющей головы кометы Хэйла-Боппа. Рассмотрены особенности метода определения лучевых скоростей по эшелле спектрам с неразведенными порядками. Обсуждается метод определения лучевых скоростей с непрерывной привязкой к реперному спектру паров йода.

В третьей главе изложены результаты создания библиотеки спектров звезд спектральных классов F и G, включая звезды различной металличности и разных классов светимости. Представлены фрагменты атласа спектров F- и G-звезд в диапазоне длин волн 4540–6620 ÅÅ, полученного по наблюдениям на спектрографе PFES (R = 15 000). На примере атласа рассмотрены эффекты температуры, светимости, металличности, проекции скорости осевого вращения. Ассортимент заявок на исследование звезд, поступающих на 6-м телескоп, состоит, преимущественно, из задач исследования объектов с особенностями (пекулярностями) спектров. Рутинные задачи массовой спектроскопии звезд менее популярны. Поэтому атлас прежде всего представляет ценность как систематизированная информация о спектрах обычных объектов, полученных в идентичных условиях (диапазон, спектральное разрешение, отношение сигнал/шум (S/N)). На основе атласа могут быть построены системы спектральных критериев, аналогично тому, как это было сделано по фотографическому (синему) спектральному диапазону в эпоху создания системы спектральной классификации. Вторую часть третьей главы занимает описание атласа звезд с дефицитом металлов, построенного в диапазоне 3550–5000 ÅÅ по результатам наблюдений на кварцевом эшелле спектрографе НЭС. В синем и УФ диапазонах спектра плотность линий атомов и ионов такова, что у звезд солнечной металличности спектр представляет собой сплошную бленду, и точность спектра ограничивается неопределенностью проведения уровня непрерывного спектра над этой блендой. По мере понижения содержания металлов, немногочисленные линии длинноволнового диапазона ослабевают вплоть до полного исчезновения большинства линий, и коротковолновый диапазон оказывается наиболее информативным. В результате оснащения спектрографа NES матрицей ПЗС с числом элементов 2048x2048 и с высокой квантовой эффективностью в синей области спектра (Панчук и др., 2002), стали доступны наблюдения слабых звезд в указанном диапазоне, в частности, выполнены наблюдения группы малометалличных звезд с высоким S/N. Наблюдательный материал послужил основой для составления атласа малометалличных звезд в диапазоне 3550–5000 ÅÅ (R = 60 000). Атлас не имеет мировых аналогов.

В четвертой главе изложены результаты спектроскопического исследования холодных звезд с большими собственными движениями. Поскольку выборка звезд, представленная в данной работе, охватывает практически весь диапазон металличностей, наблюдаемый в Галактике, перечислены основные наблюдательные и теоретические проблемы, связанные с исследованием химического состава атмосфер непроэволюционировавших звезд. Современные наблюдательные возможности (в первую очередь это спектрографы высокого разрешения в сочетании с большими телескопами), определяют круг главных задач данного направления. Во-первых, это задача исследования обилий химических элементов в атмосферах звезд, в диапазоне металличностей от 0 до −3 dex, полученных с высокой точностью и на однородном спектральном материале. При этом для исключения систематических погрешностей в результатах желательно проводить анализ данных в одной системе (силы осцилляторов, метод получения фундаментальных параметров модели звездной атмосферы). Задача осложняется тем, что для звезд различной металличности измерениям доступны различные наборы спектральных линий, слабо перекрывающиеся друг с другом. Общие закономерности поведения содержаний различных элементов с металличностью, выявляемые в таком исследовании, являются эмпирической основой моделей химической эволюции Галактики. Современный уровень наблюдений позволяет установить (для конкретных звезд) отклонения в содержании тех или иных элементов от общих закономерностей. Ранее такие отклонения было принято объяснять ошибками определения содержаний. Теперь проблема (доходящей до 1.5–2 dex) дисперсии содержания тяжелых элементов в звездах со сверхдефицитом металлов ([Fe/H] $<$ 3) является второй крупной задачей, решение которой определяется повышением спектрального разрешения и возможностью получения спектров слабых звезд. Третьей задачей является определение различий в химическом составе для разных составляющих населения Галактики, в первую очередь в звездах гало и диска, в области перекрытия значений металличности этих населений ($-1.5 <$ [Fe/H] < -0.5). Такие различия не превышают (в зависимости от элемента) нескольких сотых dex, точность определения содержаний в этом случае должна быть высокой, а это опять же означает необходимость получения спектров с как можно более высоким отношением S/N при высоком спектральном разрешении. Эта задача требует учета кинематических характеристик звезд. Акцентируется внимание на новой возможности определения содержаний целого ряда тяжелых элементов r- и s-процесса по спектрам в синей и ультрафиолетовой области, полученных на БТА с разрешением R $\approx$ 60 000. Показана принципиальная возможность использования этого спектрального материала для решения задачи радиоактивной космохронометрии с использованием линий ^{232}Th. Спектроскопические исследования, приведенные в четвертой главе, в совокупности с опубликованными данными, могут привлекаться для решения этих четырех задач. Приведен список исследованных звезд, составленный на основе выборки звезд с большими собственными движениями Карню и др. (1994). Изложена методика определения эффективной температуры, силы тяжести, микротурбулентной скорости и химического состава. Результаты расчета параметров моделей атмосфер указывают на то, что часть звезд, классифицированных ранее фотометрическими методами как субкарлики, имеет более высокий класс светимости и относится скорее к субгигантам. Поскольку как при расчете химических обилий, так и при определении фундаментальных параметров моделей звездных атмосфер важную роль играют атомные данные, вопросу выбора системы сил осцилляторов уделено особое внимание. Анализируются ошибки определения содержаний элементов, вносимые различными причинами, а именно: ошибками измерения эквивалентных ширин и используемых атомных данных, определения фундаментальных параметров, игнорированием эффектов отклонений от приближения локального термодинамического отклонения и сверхтонкого расщепления. Приведены результаты определения содержаний 29 элементов в атмосферах 38 звезд. Анализ содержаний для каждого элемента или группы элементов сопровождается описанием соответствующих возможных источников синтеза.

Как правило, рассматриваются зависимости дифференциальных содержаний [X/Fe] от металличности [Fe/H]. Для большинства звезд в интервале металличности от -2.5 до $0\,\mathrm{dex}$ получены содержания, характерные для данного диапазона металличностей. Так, элементы α-процесса Mg, Ca и Ti находятся в избытке у звезд с более низкой металличностью. Для Ni, являющегося элементом железного пика, во всем диапазоне металличностей отношение $[\mathrm{Ni/Fe}] = 0$. Для ряда других элементов этой группы (V, Co, Zn) наблюдается несколько повышенное, а для Cr – пониженное по отношению к солнечному содержание в самых малометаллиных звездах. Mn, элемент группы железа с нечетным числом протонов в ядре, показывет пониженное содержание при низких металличностях и постепенное увеличение с ростом металличности. Элементы s-процесса Y и Ba находятся в слабом избытке в звездах промежуточной металличности ($[\mathrm{Fe/H}] > -1.8\,\mathrm{dex}$), а при более низких металличностях содержание этих элементов резко уменьшается. В то же время для элементов r-процесса в наиболее малометаллиных звездах наблюдаются избытки до $\approx 1\,\mathrm{dex}$. Проведен анализ химического состава звезд с сверхдефицитом металлов ($[\mathrm{Fe/H}] < -2.5\,\mathrm{dex}$). Для ряда элементов, особенно для элементов s- и r-процесса, по совокупности этих звезд наблюдается разброс содержаний, составляющий 1 dex и более. Другая часть элементов показывает лишь небольшое отклонение от общих закономерностей (например, Cr, V), а некоторые (Ni), следуют им в точности. Содержания химических элементов, синтезируемых в процессах разного типа, сравниваются с кинематическими характеристиками звезд: тангенциальной составляющей скорости, максимальным удалением от галактической плоскости, апогалактическим расстоянием. Отдельное внимание уделяется звезде G 251-54 ($[\mathrm{Fe/H}] = -1.55\,\mathrm{dex}$), в атмосфере которой наблюдается, в отличие от других звезд близкой металличности, сверхдефицит ряда элементов. Нами были получены следующие значения содержания элементов в атмосфере G 251-54: $[\mathrm{O/Fe}] = +0.47$, $[\alpha/\mathrm{Fe}] \approx -0.3$, $[\mathrm{Na/Fe}] = -0.60$, $[\mathrm{Sc/Fe}] = -0.57$, $[\mathrm{Cr, Ni/Fe}] \approx 0$, $[\mathrm{Mn/Fe}] = -0.52$, $[\mathrm{Cu/Fe}] = -0.66$, $[\mathrm{Y/Fe}] = -0.70$, $[\mathrm{Ba/Fe}] = -1.35\,\mathrm{dex}$. Достигнутый в данной работе уровень точности определения содержания химических элементов в атмосферах маломассивных звезд позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, перемешивание вещества в Галактике на ранних стадиях ее эволюции не было полным, что подтверждается сильным разбросом содержания ряда элементов в атмосферах сверхмалометаллиных звезд. Во-вторых, не наблюдается статистически значимых зависимостей дифференциальных содержаний химических элементов [X/Fe] от тангенциальной составляющей скорости, максимального удаления от галактической плоскости, апогалактического расстояния, – это свидетельствует об отсутствии резких перемен ролей различных механизмов обогащения химическими элементами на этапах эволюции гало. В-третьих, существуют звезды (например, G 251-54), история происхождения которых принципиально отличается от происхождения подавляющего большинства звезд гало.

Атласы спектров, списки эквивалентных ширин линий в спектрах исследованных звезд, использованные при расчете химических обилий силы осцилляторов, результаты определений содержаний по отдельным линиям – доступны **в электронной форме** по адресу www.sao.ru/~ valenta/Lss.html

В Заключении сформулированы основные выводы работы.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Ermakov S.V., Panchuk V.E. *On the problem of measurement of radial velocity* // 1996, Bull. Spec. Astropys. Observ., v. 39, p. 161-163.

2. Klochkova V.G., Ermakov S.V., Panchuk V.E. *Express method of search for strong magnetic fields* // 1996, Bull. Spec. Astropys. Observ., v. 41, p. 58-63.

3. Panchuk V.E., Najdenov I.D., Klochkova V.G., Ivanchik A.V., Ermakov S.V., Murzin V.A. *On the problem of high spectral resolution observations of faint objects* // 1998, Bull. Spec. Astropys. Observ., v. 44, p. 127-131.

4. Panchuk V.E., Ermakov S.V., Bondarenko Yu. *The iodine absorption cell for the BTA Nasmyth-2 focus spectrometers* // 1998, Bull. Spec. Astropys. Observ., v. 44, p. 132.

5. Ermakov S.V., Klochkova V.G. *Spectroscopy of halo stars* // 1998, Bull. Spec. Astropys. Observ., v. 46, p. 110-117.

6. Klochkova V.G., Ermakov S.V., Panchuk V.E. *High resolution spectroscopy of selected faint stars* // 1999, Astrophys. & Space Sci., v. 265, p. 185.

7. T.V.Mishenina, V.G.Klochkova,V.E.Panchuk, S.V.Ermakov. *Spectroscopic investigation of the metal-poor binary star G176-27* // 1999, Proceeding of the 35th Liege Int. Astroph. Coll. July 5-8, 1999. "The galactic halo:

from globular clusters to field stars", eds. A. Noels, P.Magaine, D.Caro, E.Jehin, G. Parmentier, A.Thoul., p. 261-264.

8. Usenko I.A., Kovtyukh V.V., Klochkova V.G., Panchuk V.E., Ermakov S.V. *Spectroscopic investigations of classical Cepheids and main-sequence stars in galactic open clusters and associations. I. Association Cas OB2 and the small-amplitude Cepheid SU Cassiopeae* // 2001, Astron. Astrophys., v. 367, p. 831-839.

9. Клочкова В.Г., Ермаков С.В., Панчук В.Е. *Атлас спектров F- и G-звезд* // 2001, Препринт САО № 157, с. 1-41.

10. Ченцов Е.Л., Ермаков С.В., Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Бьеркман К., Мирошниченко А.С. *Атлас спектров гипергигантов и сверхгигантов B6–A2 в диапазоне от 4800 до 6700 ÅÅ* // 2001, Препринт САО № 161, с. 1-36.

11. Ермаков С.В., Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Жао Г. *Химический состав звезд в гало Галактики* // 2002, Астрон. журн., т. 79, № 11.

12. Панчук В.Е., Пискунов Н.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Ермаков С.В. *Спектральный комплекс фокуса Нэсмит 6-м телескопа БТА. X. Позиционные и фотометрические характеристики кварцевого эшелле-спектрографа НЭС с крупноформатной матрицей "Уппсала ПЗС"* // 2002, Препринт САО № 169, с. 1-15.

13. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Пискунов Н.Е., Монин Д.Н., Юшкин М.В., Ермаков С.В., Найденов И.Д. *Комплекс аппаратуры для спектроскопических исследований звезд на 6-метровом телескопе БТА* // 2002, Препринт САО № 170, с. 1-11.

14. Панчук В.Е., Ермаков С.В., Клочкова В.Г. *Исследование звезд гало. I. Атлас спектров в диапазоне 3550-5000 ÅÅ.* // 2002, Препринт САО № 172, с. 1-62.

15. Chentsov E.L., Ermakov S.V., Klochkova V.G., Panchuk V. E., Bjorkman K. S., Miroshnichenko A. S. *An atlas of spectra of B6-A2 hypergiants and supergiants from 4800 to 6700 ÅÅ* // 2002, Astron. Astrophys., (accepted 23/07/2002).

Список литературы

Бирс и др., (T.C.Beers, G.W.Preston, S.A.Shechtman) // 1985, Astron. J., 90, p.2089.

Карню и др. (Carney B.W., Latham D.W., Laird J.B., Aguilar L.A.) // 1994, Astron. J., 107, p.2240.

Ниссен, (P.E.Nissen) // 1992, in "High Resolution Spectroscopy with the VLT", ESO Conference and Workshop Proceedings №40, p.49.

Панчук и др., (Panchuk V. E., Najdenov I. D., Klochkova V. G., Ivanchik A. B., Ermakov S. V., Murzin V. A.) // 1998, Bull. Spec. Astropys. Observ., vol.44, p.127.

Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д. // 1999a, Препринт САО № 135.

Панчук В.Е.,Клочкова В.Г., Найденов И.Д.,Витриченко Э.А., Викульев Н.А., Романенко В.П. // 1999б, Препринт САО № 139.

Панчук В.Е., Пискунов Н.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Ермаков С.В. // 2002, Препринт САО № 169.

Бесплатно

Сергей Владимирович Ермаков

Спектроскопические исследования атмосфер маломассивных звезд

Зак. № 121 с   Уч. изд. л. – 1.0   Тираж 100

Специальная астрофизическая обсерватория РАН