

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт астрономии Российской академии наук

На правах рукописи  
УДК 524.38

**Алексеева Софья Александровна**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА И НАТРИЯ  
У ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ В–К С УЧЕТОМ  
ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ЛОКАЛЬНОГО  
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ**

Специальность 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва  
2017

Работа выполнена в отделе нестационарных звезд и звездной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук.

**Научный руководитель:**

**Машонкина Людмила Ивановна** – доктор физико-математических наук, заведующая отделом нестационарных звезд и звездной спектроскопии ФГБУН Института астрономии РАН (ИНАСАН), г. Москва.

**Официальные оппоненты:**

**Ламзин Сергей Анатольевич** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории новых фотометрических методов Государственного астрономического института им П.К.Штернберга Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова (ГАИШ МГУ), г. Москва.

**Коротин Сергей Анатольевич** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Крымской астрофизической обсерватории РАН (ФГБУН КраО РАН), пос. Научный, Республика Крым, РФ.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования „Казанский (Приволжский) федеральный университет“. г. Казань.

Защита состоится «23» мая 2017 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт космических исследований РАН, зал семинаров - ком. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе "Диссертационный совет".

Автореферат разослан «...» марта 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Стремительное развитие инструментов для анализа оптических спектров и запуск новых телескопов привели к значительному улучшению качества спектральных наблюдений звезд. Благодаря эшелле-спектрографам стало возможным получать спектры звезд в широком спектральном диапазоне с разрешением вплоть до  $R = \lambda/\Delta\lambda = 120\,000$  и высоким сигналом к шуму.

Высокая точность наблюдений требует улучшения теоретических методов спектрального анализа, моделирования атмосфер и формирования спектральных линий. Широко используемый классический подход с предположением о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) не позволяет проводить детальную интерпретацию спектров и может приводить к ошибочным выводам. Наиболее физически обоснованным и реалистичным является не-ЛТР подход, в котором населенности получают в результате решения системы уравнений статистического равновесия совместно с уравнением переноса излучения, в отличие от ЛТР, где населенности атомных уровней рассчитываются по формулам Больцмана и Саха. Не-ЛТР подход требует большого числа входных атомных данных и времени для построения и тестирования моделей атомов, изучения механизмов, ответственных за распределение населенностей атомных уровней в атмосферах звезд с различными физическими условиями.

В литературе существует несколько примеров, где показано, что эмиссия в линиях может возникать из-за не-ЛТР эффектов в атмосферах звезд. Например, линия Mg I  $12\ \mu\text{m}$  на Солнце [1], Mn II  $6122\text{-}6132\ \text{\AA}$  в трех звездах поздних спектральных классов В [2], C II  $6151, 6462\ \text{\AA}$  в  $\tau$  Sco (B0V) и C II  $6462\ \text{\AA}$  в HR 1861 (B1V) [3]. Однако, исследования в этой области немногочисленны, и до сих пор остаются невыясненными причины эмиссионных линий других металлов (пр. Mg II, Si II, P II, Ca II, Cr II, Fe II, Ni II, Cu II и Hg II), наблюдающихся в спектрах В-звезд главной последовательности [4]. Кроме того, были обнаружены эмиссионные линии C I в инфракрасной (ИК) области спектра в атмосфере  $\pi$  Cet (B7IV) [5], которые невозможно интерпретировать в рамках ЛТР анализа. В литературе отсутствует анализ не-ЛТР эффектов в атмосферах звезд с эффективными температурами ( $T_{\text{eff}}$ ) от 10000 до 15000 К для линий C I в ИК области. Вследствие этого возникает вопрос, связано ли появление эмиссии с аномальным распределением температуры в ее атмосфере, наличием околозвездного диска, как предполагают авторы [5], или с не-ЛТР эффектами.

При определении содержания<sup>1</sup> химических элементов в рамках ЛТР зачастую сталкиваются с проблемой расхождения содержания, полученного по разным линиям. Так, например, в обзоре Асплунда [6] обсуждаются расхождения между линиями Fe I и Fe II, которые используются для уточнения физических параметров звезд. Расхождение может возникать при определении содержания как по линиям одной стадии ионизации, так и по линиям разных стадий ионизации. Например, Фоссати и др. [5] определили содержание углерода у нескольких АВ звезд с надежными параметрами атмосферы. Авторами было получено различие в содержании углерода по линиям C I и C II в атмосфере  $\pi$ Сет, что подтверждает более ранние результаты Роби и Ламберта [7], где содержание по линиям C II оказалось в четыре раза выше, чем по линиям C I. Для 21 Рег (В9.5V) полученное содержание по слабым линиям C I видимой области оказалось почти в шесть раз меньше, чем по сильным ИК линиям C I. Расхождения наблюдаются не только у углерода, но и у многих других элементов, что побуждает к отказу от приближенного ЛТР подхода.

Оригинальные методы не-ЛТР вычислений для C I – C II в атмосферах ранних А и поздних В звезд были разработаны в [8–10]. Ренч-Холм [9] выполнила не-ЛТР анализ в А звездах с эффективной температурой 10000 К, Пшибилла и др. [8] выполнили не-ЛТР расчеты для C I – C II применительно к атмосфере Веги ( $T_{\text{eff}} = 9550$  К,  $\log g = 3.95$ ). В обеих работах показано, что не-ЛТР приводит к усилению линий C I по сравнению с ЛТР за счет падения функции источников относительно функции Планка в области формирования линий. Поскольку C II доминирующая стадия ионизации на всех глубинах в атмосфере, то отклонения от ЛТР для основного состояния C II незначительны. Ниева и Пшибилла [10] определили не-ЛТР содержание для 20 ранних В звезд в диапазоне температур 16000–33000 К.

Несмотря на немалое количество работ по не-ЛТР расчетам для C I – C II, до сих пор остается ряд проблем, решение которых представлено в диссертации. Это объяснение эмиссионных линий C I в спектрах В звезд, достижение ионизационного равновесия по линиям C I – C II и выяснение причины расхождения содержания по разным линиям C I у А и В звезд.

Применение не-ЛТР подхода для определения содержания играет важную роль для таких областей астрофизики, как звездный нуклеосинтез, звездная эволюция и химическая эволюция Галактики. Для решения проблем химической эволюции Галактики важным является изучение содержания элементов у звезд поздних спектральных классов в широком диапа-

---

<sup>1</sup>Содержание химического элемента X задается величиной  $\log(N_X/N_H)$ , где  $N_X$  и  $N_H$  - концентрации частиц элемента X и водорода, соответственно.

зоне металличности, где металличность звезды характеризуется величиной  $[\text{Fe}/\text{H}]^2$  и выступает индикатором возраста звезды. При проведении спектроскопического анализа, на основе которого определяются содержания элементов, как правило, используют звезды карлики главной последовательности, потому что в их атмосферах содержание элементов отражает ту величину, которая была в протозвездном облаке в результате химической эволюции предыдущего поколения звезд. Для того, чтобы получить наблюдаемое содержание, требуются наиболее реалистичные модели звездных атмосфер и процессов формирования линий.

В литературе существует большое количество работ, в которых у набора звезд в широком интервале металличности содержание элементов определялось в ЛТР. Эти исследования демонстрируют различные наблюдаемые тренды  $[\text{C}/\text{Fe}]$  от  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . Так, например, для FG карликов в диапазоне металличностей от  $-1$  до  $0$  Бенсби и Фельцинг [11] нашли среднее значение  $[\text{C}/\text{Fe}]$ , близкое к солнечному, используя только одну запрещенную линию  $[\text{C I}]$ , а Редди и др. [12], исследовав другие звезды с близкими параметрами, получили содержание углерода превышающее солнечное более чем в два раза, используя слабые линии  $\text{C I}$ . Для звезд с большим дефицитом металлов в интервале  $[\text{Fe}/\text{H}]$  от  $-3$  до  $-1$ , Акерман и др. [13] получили, в среднем,  $[\text{C}/\text{Fe}] = +0.27$ , что чуть менее чем в два раза превышает солнечное. Карбон и др. [14] на основании наблюдений молекулярных  $\text{CH}$  полос в 83 карликах в диапазоне  $-3.2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.5$  нашли  $[\text{C}/\text{Fe}] = -0.03$ . Спит и др. [15] исследовали молекулярные  $\text{CH}$  полосы в группе гигантов, не достигших стадии перемешивания, и в диапазоне  $-4.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$  нашли величину  $[\text{C}/\text{Fe}] = +0.18$ .

Однако, использовать эти данные как наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики весьма сомнительно, потому что величины не-ЛТР эффектов для линий  $\text{C I}$  зачастую очень сильно зависят от металличности звезды. В результате могут возникать систематические сдвиги на зависимости  $[\text{X}/\text{H}]$  от  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . Так, например, Баумюллер и Герен [16] указали на важность учета не-ЛТР эффектов для линий  $\text{Al I}$  в звездах поздних спектральных классов при исследовании химической эволюции Галактики.

Оригинальные методы не-ЛТР вычислений для  $\text{C I}$  в звездах солнечного типа были разработаны в [8, 17–21]. Согласно Штюренбургу и др. [19], ЛТР содержание углерода на Солнце, полученные по видимым линиям  $\text{C I}$ , значительно ниже, чем по ИК-линиям. В качестве примера, расхождения

---

<sup>2</sup>Различие в содержании какого-либо элемента  $X$  между звездой и Солнцем задается величиной  $[\text{X}/\text{H}] = \log(N_X/N_H)_* - \log(N_X/N_H)_\odot$ , где  $N_X$  и  $N_H$  - концентрации частиц элемента  $X$  и водорода, соответственно.

между солнечными С I 9111 Å и 5380 Å линиями достигает 0.37 dex. С применением не-ЛТР подхода, разница между содержанием, полученным по видимым и ИК-линиям, устраняется. Такеда и Хонда [22] и Фаббиан и др. [21] исследовали отклонения от ЛТР для С I в широком диапазоне параметров. Эти исследования дают согласующиеся в пределах 0.15 dex не-ЛТР поправки для общих параметров звездных атмосфер. Различия обнаруживаются в моделях с высокой  $T_{eff}$  и низким  $\log g$  и  $[M/H]$ , для которых Фаббиан и др. [21] предсказывает более сильные не-ЛТР эффекты.

Фаббиан и др. [21] показали, что на основе ЛТР и не-ЛТР подходов для одной и той же выборки звезд, можно по-разному интерпретировать роль различных источников в производстве углерода. Так, например, в случае не-ЛТР анализа получено  $[C/Fe] \sim 0.0$  на интервале металличностей от  $-3.0$  до  $-0.6$ . В случае ЛТР анализа получают избытки углерода по отношению к Fe, для интерпретации которых требуется учет дополнительного источника производства углерода в ранней Галактике.

Несмотря на большое число исследований в области определения содержания углерода у звезд с дефицитом металлов, требуется уточнение наблюдательных данных с привлечением не-ЛТР метода определения содержания углерода у однородной выборки звезд. В этой диссертации у выборки звезд, включающей 51 FGK-карлик в диапазоне металличности от  $-2.6$  до  $0.2$  с точными атмосферными параметрами определяется содержание углерода с учетом отклонения от ЛТР. На основе полученного содержания анализируются отношения  $[C/Fe]$  и  $[C/O]$ .

По всей видимости, различные тренды  $[C/Fe]$  от  $[Fe/H]$ , полученные в наблюдениях могут быть связаны не только с учетом не-ЛТР эффектов, но и с использованием различных индикаторов, используемых при определении содержания углерода. Для определения содержания углерода используют: разрешенные линии С I и одну запрещенную [С II], а также молекулярные линии СН, С<sub>2</sub> и СО. Атомарные линии С I наблюдаются в видимой ( 4300 – 7900 Å ) и ближней ИК ( 7900 – 20000 Å ) областях спектра. Силы осцилляторов для видимых линий намного меньше, чем для ИК-линий, поэтому в спектрах звезд линии видимой области значительно слабее.

Для звезд с  $[Fe/H] > -1.5$  все индикаторы могут быть использованы для определения содержания углерода, за исключением запрещенной линии, которая видна только в спектрах звезд с солнечной металличностью и выше.

Для звезд с  $[Fe/H] < -1.5$  видимые линии становятся слабыми для надежного определения содержания, поэтому могут быть использованы только ИК-линии наряду с молекулярными линиями.

Для звезд с  $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$  атомарные линии практически исчезают и только молекулярные линии остаются доступными для определения содержания.

Томкин и др. [23], исследуя карлики с дефицитом металлов, на основе 1D анализа получили не-ЛТР содержание углерода по атомарным линиям выше, в среднем, на 0.40 dex, чем по молекулярным СН линиям. А именно, линии С I дают, в среднем,  $[\text{C}/\text{Fe}] = +0.3$ , в то время как линии СН  $[\text{C}/\text{Fe}] = -0.1$ . Можно выделить, по меньшей мере, три причины расхождения между результатами, полученными на основе различных индикаторов, а именно, неучет гидродинамических эффектов (3D эффекты) в классических плоско-параллельных (1D) моделях атмосфер, приближенное рассмотрение формирования линий и неопределенности в физических параметрах звезд,  $T_{eff}$  и  $\log g$ .

Трехмерные (3D) гидродинамические расчеты более реалистично описывают конвекцию в атмосфере звезды, исключая необходимость введения таких параметров, как скорости микротурбулентности и макротурбулентности, которые приходится вводить при использовании 1D моделей. Расчеты 3D моделей достаточно трудоемки и немногочисленны. При определении содержания углерода на Солнце для атомарных линий было показано, что 3D поправки (разница в содержании, полученная с использованием 3D и 1D моделей) малы и составляют, в среднем, +0.01, +0.01 и -0.02 dex для линий С I, СН и С<sub>2</sub>, соответственно [24]. В атмосферах звезд с дефицитом металлов 3D вычисления Добровольская и др. [25, 26] предсказывают поправки для ИК линий С I не более нескольких сотых в логарифмической шкале. Галлахер и др. [27] показали, что для FGK карликов 3D поправки у молекулярных СН полос, могут усиливаться с уменьшением металличности и увеличением температуры, и в некоторых случаях могут достигать величины вплоть до -0.25.

В связи с этим, при анализе содержания углерода в широком диапазоне металличностей необходима уверенность в том, что различные индикаторы, а именно, атомарные и молекулярные линии, дают согласующиеся результаты. В диссертации для каждого из 47 FGK-карликов проводится сравнение содержания, полученного по атомарным линиям С I и молекулярным линиям СН. При этом атомарные линии С I рассматриваются в условиях отклонения от ЛТР, а для молекулярных линий СН предполагается ЛТР. При сравнении атомарных и молекулярных линий принимаются во внимание 3D эффекты для линий СН согласно работе Галлахера и др. [27].

Для решения проблем нуклеосинтеза натрия, важно понимать преимущественно в каких термоядерных реакциях синтезируется натрий. На-

трий может синтезироваться в реакциях горения углерода ( $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}\rightarrow ^{23}\text{Na}+\text{p}$ ) во внутренних слоях массивных звезд. В этом случае скорость производства не зависит от содержания металлов в предыдущем поколении звезд [28], и натрий относится к первичным элементам. С другой стороны, натрий может синтезироваться в NeNa-цикле ( $^{22}\text{Ne}+\text{p}\rightarrow ^{23}\text{Na}+\gamma$ ) во всех звездах с  $M > 1.5 M_{\odot}$ , либо в реакциях с участием  $\alpha$ -частиц в АВГ звездах. В NeNa-цикле скорость производства зависит от избытка протонов, который определяется начальным содержанием металлов [29]. В этих случаях натрий рассматривается как вторичный элемент. Определение и анализ изменений содержания Na с возрастом Галактики помогут прояснить типы термоядерных реакций, механизмы и скорости производства натрия.

Исследование различий в содержании натрия между тонким и толстым дисками важно для понимания химической эволюции Галактики. С этой целью, как правило, используют звезды-карлики главной последовательности. Маломассивные гиганты ( $M < 2.0 M_{\odot}$ ) тоже можно использовать для решения задач химической эволюции Галактики, поскольку они не достигли стадии выноса элементов. Следует отметить, что гиганты имеют свое преимущество в светимости, которая выше, чем у карликов.

В литературе представлено много результатов по определению содержания натрия. Большинство из них выполнены в рамках ЛТР. Согласно проведенным исследованиям звезд-карликов с  $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$  в работах Редди и др. [30] и Бенсби и др. [31], различие в  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  между тонким и толстым дисками не обнаруживается. Алвес-Брито и др. [32] не обнаружили различия  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  между красными гигантами толстого и тонкого дисков. В то время, как при исследовании красных гигантов в работах Пахомова [33, 34] на основе ЛТР подхода показано, что в тонком диске содержание  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  больше, чем в толстом. Неизбежно возникает вопрос, не связан ли полученный результат с учетом отклонения от ЛТР, что мотивирует на проведение ревизии.

Представляется интересным сравнить содержание  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  между карликами и гигантами. Некоторые исследования показали, что  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  в атмосферах красных гигантов выше, чем в атмосферах карликов [35, 36]. Однако, гиганты имеют более разреженные атмосферы по сравнению с карликами, а значит, эффекты отклонения от ЛТР будут по-разному проявляться в атмосферах этих звезд. Таким образом, существует необходимость привлечения не-ЛТР подхода для сравнения между собой звезд карликов и звезд гигантов. Кроме того, металличности звезд толстого диска в среднем ниже металличности звезд тонкого диска, хотя, они и имеют область перекрытия [37]. Поскольку в звездах различных металличностей могут по-разному проявляться эффекты отклонений от ЛТР, при определении



содержания натрия у звезд тонкого и толстого дисков Галактики следует учитывать не-ЛТР эффекты.

Оригинальные методы не-ЛТР вычислений для Na I были разработаны в [38–45]. Во всех работах показано, что основной механизм отклонения от ЛТР для Na I это сверхрекомбинация, когда нижние уровни Na I оказываются перезаселенными относительно ЛТР населенностей благодаря рекомбинациям на высоковозбужденные состояния с последующими каскадными переходами на нижние уровни. В связи с простой структурой термов этого элемента, для него выполнены точные квантовомеханические расчеты как для столкновений с атомами водорода, так и с электронами. Это делает моделирование формирования линий при отказе от ЛТР более надежным.

В диссертации разрабатывается оригинальная методика определения содержания натрия с учетом отклонения от ЛТР. У выборки звезд, включающей 51 FGK-карлик в диапазоне металличности от  $-2.6$  до  $0.2$  с точными атмосферными параметрами определяется содержание натрия с учетом отклонения от ЛТР. Проводится ревизия результатов, полученных Пахомовым [33, 34], путем определения содержания натрия у 78 красных GK-гигантов, принадлежащих толстому и тонкому дискам Галактики.

Цирконий (атомная масса  $A = 91.22$ ) может формироваться в трех типах реакций нейтронных захватов: быстрый r- (rapid) и медленный s- (slow) процессы, у которого выделяется главная компонента (s-main) и вторичная (s-weak). R-процесс обычно связывают со вспышками сверхновых звезд II типа. Слабая компонента s-процесса может протекать в ядрах массивных звезд ( $M > 20 M_{\odot}$ ) на стадии гидростатического горения гелиевого ядра, главная компонента s-процесса – в звездах промежуточных масс ( $2-4M_{\odot}$ ) на стадии горения двойного слоевого источника. В процессе эволюции Галактики соотношение вкладов каждого из трех процессов в содержание элемента менялось со временем. На сегодня нет точных предсказаний выходов элементов теории r-процесса и слабой компоненты s-процесса, поэтому важно восстановить картину обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами на основе наблюдательных данных и, таким образом, получить ограничения на результаты теории нуклеосинтеза. Существует много работ по определению содержания циркония и других элементов нейтронных захватов. Большинство из них выполнено в рамках ЛТР. Интерес представляет сравнение циркония с другими элементами, синтезируемыми в реакциях нейтронных захватов, например, со стронцием. Поскольку Zr и Sr – легкие элементы нейтронных захватов, имеющие близкие заряды ядра, то предполагается, что они синтезировались в одних и тех же типах звезд и в одних и тех же реакциях. В ранней Галактике тяжелые элементы

синтезировались только в  $r$ -процессе, поскольку первые звезды промежуточных масс еще не проэволюционировали. Травальо и др. [46] собрали все наблюдательные данные по определению содержания стронция, иттрия и циркония и нашли, что в ранней Галактике отношение  $[Zr/Fe]$  значительно выше, чем отношение  $[Sr/Fe]$ . Это противоречит тому предположению, что в ранней Галактике цирконий и стронций синтезировались только в одном  $r$ -процессе и свидетельствует о наличии дополнительного источника производства циркония.

В связи с этим, важно определить содержание циркония и стронция при отказе от ЛТР у однородной выборки звезд с надежными параметрами, что и выполнено в этой диссертации.

## Цель диссертационной работы

При работе над диссертацией были поставлены следующие цели:

- Изучение формирования линий  $C\ I - C\ II$  и  $Na\ I$  в условиях отклонения от ЛТР в широком диапазоне звездных параметров;
- Использование теоретических не-ЛТР методов анализа линий  $C\ I$ ,  $Na\ I$ , и  $Zr\ II$  для определения содержания элементов у выборки звезд в широком диапазоне металличности с целью решения задач химической эволюции Галактики.

## Научная новизна

В диссертационной работе впервые были получены следующие результаты:

1. Построена модель атома  $C\ I - C\ II$  с использованием современных данных о сечениях столкновений с электронами. Продемонстрирована важность применения точных данных на примере моделирования эмиссионных линий  $C\ I$  в атмосферах В-карликов.
2. Объяснен механизм формирования эмиссионных линий  $C\ I$  8335, 9405, 9061-9111, 9603-9658 Å в атмосферах четырех карликов спектрального типа В. Эмиссия возникает за счет сверхионизации  $C\ I$ , приводящей к большему опустошению нижних ( $3s^1P^\circ$  и  $3s^3P^\circ$ ) по сравнению с верхними уровнями исследуемых переходов, и опустошения уровней  $3s^1P^\circ$  и  $3s^3P^\circ$  при спонтанных переходах на низковозбужденные уровни и основное состояние в слоях, где среда становится оптически тонкой в соответствующих УФ линиях.

3. Для тех же звезд достигнуто согласие не-ЛТР содержания по линиям двух стадий ионизации углерода, включая эмиссионные линии C I.
4. Определено содержание натрия при отказе от ЛТР у 78 красных гигантов, принадлежащих тонкому и толстому дискам Галактики с использованием разработанной автором не-ЛТР методики. Показано, что отношение  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  у звезд толстого диска согласуется с аналогичным отношением у звезд тонкого диска и близко к солнечному.
5. У выборки звезд, включающей 51 FGK-карлик в диапазоне металличности от  $-2.6$  до  $0.2$  с точными атмосферными параметрами, определено содержание C, Na, Zr с учетом отклонения от ЛТР. Полученные зависимости  $[\text{C}/\text{O}]$ ,  $[\text{Na}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Zr}/\text{Fe}]$  и  $[\text{Zr}/\text{Sr}]$  представляют интерес для изучения химической эволюции Галактики.
6. Показано, что для каждой звезды из 47 FGK-карликов в диапазоне металличности от  $-2.5$  до  $0.2$  содержание углерода, полученное по молекулярным линиям CN согласуется с не-ЛТР содержанием по атомарным линиям C I. Это позволяет сделать важный вывод о возможности использования молекулярных линий CN в рамках плоскопараллельных моделей атмосфер для определения содержания углерода, в том числе, для звезд с низкой металличностью, где атомарные линии отсутствуют.

## Научная и практическая значимость

Разработанные и оттестированные модели атомов C I – C II и Na I могут быть использованы для решения различных астрофизических задач. Объяснение эмиссии в линиях C I как проявление не-ЛТР эффектов в звездной атмосфере, может мотивировать исследование эмиссионных линий Mg II, Si II, P II, Ca II, Cr II, Fe II, Ni II, Cu II и Hg II, которые наблюдаются в спектрах В-звезд [47–50]. На основе полученных результатов рекомендуется использовать атомарные C I и молекулярные CN линии в качестве дополнительного индикатора определения эффективной температуры у звезд поздних спектральных классов, в том числе в автоматических методах определения параметров. Полученное не-ЛТР содержание углерода, натрия и циркония у FG-звезд различных галактических населений будут использоваться для сравнения с предсказаниями моделей химической эволюции Галактики. Основные результаты данной диссертации, определяющие ее практическую и научную значимость, опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, широко обсуждались на всероссийских

и международных семинарах и конференциях и используются в России и за рубежом.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Разработана методика расчета статистического равновесия C I – C II и проведен анализ формирования спектральных линий в условиях отклонения от ЛТР в широком диапазоне звездных параметров.
2. Объяснен механизм формирования эмиссионных линий C I 8335, 9405, 9061-9111, 9603-9658 Å в атмосферах четырех карликов спектрального типа В. Эмиссия возникает за счет сверхионизации C I, приводящей к большему опустошению нижних ( $3s^1P^\circ$  и  $3s^3P^\circ$ ) по сравнению с верхними уровнями исследуемых переходов, и опустошения уровней  $3s^1P^\circ$  и  $3s^3P^\circ$  при спонтанных переходах на низковозбужденные уровни и основное состояние в слоях, где среда становится оптически тонкой в соответствующих УФ линиях.
3. Для четырех АВ звезд показано, что содержание углерода по линиям двух стадий ионизации - C I, включая эмиссионные линии C I, и C II совпадает при условии учета отклонений от ЛТР.
4. Получено содержание натрия при отказе от ЛТР у 78 красных гигантов, принадлежащих тонкому и толстому дискам Галактики с использованием разработанной автором не-ЛТР методики. Показано, что отношение  $[Na/Fe]$  у звезд толстого диска согласуется с аналогичным отношением у звезд тонкого диска и близко к солнечному.
5. У выборки звезд, включающей 51 FGK-карлик в диапазоне металличности от  $-2.6$  до  $0.2$  с точными атмосферными параметрами, определено содержание C, Na, Zr с учетом отклонения от ЛТР. Отношения  $[C/Fe]$  показывают разброс для звезд гало, но разброс уменьшается для отношения  $[C/O]$ . Подтверждено существование локального минимума в  $[C/O]$  на металличности  $[Fe/H] = -1.5$ . Отношение  $[Na/Fe]$  у карликов толстого и тонкого дисков совпадает и близко к солнечному, при этом отмечается разброс у звезд гало. Отношение  $[Zr/Fe]$  растёт с уменьшением металличности и достигает  $[Zr/Fe] \sim 0.5$  у звезд гало. Полученные результаты помогут восстановить картину обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами и будут полезны

как наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики.

6. Показано, что для каждой звезды из 47 FGK-карликов в диапазоне металличности от  $-2.5$  до  $0.2$  содержание углерода, полученное по молекулярным линиям CN согласуется с не-LTE содержанием по атомарным линиям C I. Это позволяет сделать важный вывод о возможности использования молекулярных линий CN в рамках плоскопараллельных моделей атмосфер для определения содержания углерода, в том числе, для звезд с низкой металличностью, где атомарные линии отсутствуют.

## Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях молодых ученых Учреждения Российской Академии Наук Института астрономии РАН (2013г., 2014г., 2015г.). Результаты работы были также представлены на международных конференциях: European Week of Astronomy and Space Science (Швейцария, Женева, 2014г.), IAU-298 "Setting the Scene for Gaia and LAMOST" (Китай, Лицзян, 2013г.), "Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today" (Санкт-Петербург, 2015г.), а также на всероссийских конференциях: ВАК-2013 (Санкт-Петербург 2013г.), "Звездные атмосферы" (Санкт-Петербург 2014г.). Результаты также обсуждались на семинарах в Пекинской Национальной Астрономической Обсерватории (Китай, Пекин, 2014г.) и Уппсальского университета (Швеция, Уппсала, 2013г.).

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Соискатель имеет 11 опубликованных работ, из них по теме диссертации – 7 научных работ, из которых 6 работ с основными научными результатами опубликованы в рецензируемых научных изданиях, которые включены ВАК в перечень журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:

- 1A *Zhao G., Mashonkina L., Yan H.L., Alexeeva S., Kobayashi C., Pakhomov Yu., Shi J.R., Sitnova T., Tan K.F., Zhang H.W., Zhang J.B., Zhou Z.M., Bolte M., Chen Y.Q., Li X., Liu F., Zhai M.* Systematic Non-LTE Study of the  $-2.6 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.2$  F and G dwarfs in the Solar Neighborhood.

- II. Abundance patterns from Li to Eu // **The Astrophysical Journal**, Volume 833, Issue 2, article id. 225, 26 pp. (2016).
- 2A *Alexeeva S.A., Ryabchikova T.A., Mashonkina L.I.* NLTE carbon abundance determination in selected A- and B-type stars and the interpretation of C I emission lines // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 462, P.1123-1135, (2016).
- 3A *Ryabchikova T., Piskunov N., Pakhomov Yu., Tsymbal V., Titarenko A., Sitnova T., Alexeeva S., Fossati L., Mashonkina L.* Accuracy of atmospheric parameters of FGK dwarfs determined by spectrum fitting // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 456, P.1221-1234, (2016).
- 4A *Alexeeva S.A., Mashonkina L.I.* Carbon abundances of reference late-type stars from 1D analysis of atomic C I and molecular CH lines // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 453, P.1619–1631, (2015).
- 5A *Sitnova T., Zhao G., Mashonkina L., Chen Y., Liu F., Pakhomov Yu., Tan K., Bolte M., Alexeeva S., Grupp F., Shi R., Zhang H.-W.* Systematic Non-LTE Study of the  $-2.6 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.2$  F and G dwarfs in the Solar Neighborhood. I. Stellar Atmosphere Parameters // **The Astrophysical Journal**, Volume 808, Issue 2, article id. 148, 17 pp. (2015).
- 6A *Алексеева С.А., Пахомов Ю. В., Машонкина Л. И.* Не-ЛТР содержание натрия в красных гигантах толстого и тонкого дисков Галактики // **Письма в Астрономический Журнал**, Том 40, стр. 454–472, (2014).

По теме диссертации 1 работа опубликована в материалах международной конференции:

- 1B *Alexeeva S.A., Pakhomov Yu., Mashonkina L.I.*, Non-LTE Abundances of Sodium in the Atmospheres of Red Giants of the Thick and Thin Galactic Disks, Setting the scene for Gaia and LAMOST, IAU Symposium. Proc. 298, P. 394, (2014).

### Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают результаты, полученные диссертантом или с основным участием диссертанта. В работе [1А] диссертантом определены содержания

углерода, натрия и циркония в условиях отклонения от ЛТР. В работах [2А], [4А], [6А] диссертантом получены все представленные результаты и написан текст. В работах [3А] и [5А] диссертантом определено содержание углерода в звездах по атомарным и молекулярным линиям.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Всего в диссертации содержится 23 таблицы и 33 рисунка. Общий объем диссертации составляет 146 страниц. Библиография из 161 наименования на 20 страницах.

## Содержание работы

**Во введении** рассматривается актуальность работы, описываются поставленные цели, формулируется постановка задачи, обсуждается научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту, и список опубликованных работ по теме диссертации.

**В Главе 1 "Методы вычислений"** описана идея решения не-ЛТР задачи и метода расчета теоретического спектра. Расчет населенностей атомных уровней был проведен с использованием комплекса программ DETAIL [51], разработанного Батлером и Гиддингсом и описанного в работе [51]. В этой программе для решения уравнений переноса излучения используется метод ускоренной  $\Lambda$ -итерации в варианте, описанном Райбики и Хаммером в [52]. Также в этой главе описаны 1D модели атмосфер, которые применялись в работе.

**В Главе 2 "Анализ линий C I – C II в атмосферах A- и B- звезд"** была построена наиболее полная модель атома для C I – C II с использованием современных атомных данных и проанализированы не-ЛТР эффекты в линиях C I – C II в атмосферах A и B звезд. Не-ЛТР вычисления предсказывают, что некоторые линии C I в ИК диапазоне спектра могут быть в эмиссии в зависимости от атмосферных параметров. Сначала эмиссия появляется в синглетных линиях 8335 и 9405 Å при эффективной температуре от 9250 до 10500 К. При  $T_{\text{eff}} > 15000$  К ( $\log g = 4$ ) глубины формирования всех линий C I сдвигаются во внутренние слои и в слоях формирования линий C I 9061 – 9111 Å и 9603 – 9658 Å нарушается детальный баланс в УФ переходе  $2p^2 \ ^3P - 3s^3P^{\circ}$  (1657 Å), что приводит к опустошению уровня  $3s^3P^{\circ}$  и к эмиссии в линиях C I 9061 – 9111 Å и 9603 – 9658 Å.

Наши теоретические результаты нашли подтверждение в наблюдаемых спектрах звезд. Эмиссионные линии С I были обнаружены в четырех самых горячих звездах с  $T_{\text{eff}} \geq 10\,400$  К, и они были воспроизведены посредством наших не-ЛТР вычислений. Эмиссия возникает за счет сверхионизации С I, приводящей к большему опустошению нижних ( $3s^1P^\circ$  и  $3s^3P^\circ$ ) по сравнению с верхними уровнями исследуемых переходов, и опустошения уровней  $3s^1P^\circ$  и  $3s^3P^\circ$  при спонтанных переходах на низковозбужденные уровни и основное состояние в слоях, где среда становится оптически тонкой в соответствующих УФ линиях.

Определено содержание углерода по линиям С I – С II в условиях отклонения от ЛТР для семи АВ звезд по спектрам высокого разрешения. В четырех самых горячих наблюдаются линии двух стадий ионизации, включая эмиссионные линии С I, и по всем линиям получено согласие при определении содержания углерода. Шесть звезд показывают практически одинаковое содержание углерода, близкое к солнечному значению. Был подтвержден значительный дефицит углерода у Сириуса с  $[C/H] = -0.72$ .

В работе было продемонстрировано на сколько важным является учет точных атомных данных для вычисления статистического равновесия. В частности, эмиссионные линии С I оказались чрезвычайно чувствительными к варьированию столкновительных скоростей с электронами. Со скоростями, вычисленными приближенно по формулам эмиссионные линии не воспроизводятся. Эмиссионные линии воспроизводятся в том случае, если применяются точные квантово-механические расчеты для столкновений с электронами.

**В Главе 3 "Содержание углерода в звездах поздних спектральных классов по атомарным и молекулярным линиям"** проведен анализ линий С I в классических 1D моделях атмосфер, представляющих модели звезд поздних спектральных классов, где содержание углерода варьировалось от солнечного до  $[C/H] = -3$ . В согласии с предыдущими исследованиями нами получено, что не-ЛТР ведет к усилению линии по сравнению с ЛТР благодаря падению функции источников относительно функции Планка и усилению непрозрачности в линии. Отклонения от ЛТР велики для сильных линий, таких как С I 9061-9111 Å, 9405 Å, и 9658 Å, которые формируются в верхних слоях атмосферы, где столкновения неэффективны. Для этих линий  $\Delta_{\text{NLTE}}$ <sup>1</sup> варьируются между  $-0.10$  dex и  $-0.45$  dex, в зависимости от параметров атмосферы. Не-ЛТР поправки не превосходят 0.03 dex по абсолютной величине для слабых линий С I видимой области спектра

---

<sup>1</sup>где  $\Delta_{\text{NLTE}}$  является поправкой к содержанию и определяется  $\Delta_{\text{NLTE}} = \log \epsilon_{\text{NLTE}} - \log \epsilon_{\text{LTE}}$



4932 Å, 5052 Å, 5380 Å и 6587 Å. Не-ЛТР эффекты сильно зависят от содержания углерода в атмосфере. Поэтому не-ЛТР содержание углерода в звездах следует определять с соответствующим содержанием, с которым были выполнены вычисления.

У выборки звезд, включающей 57 FGK-карликов в диапазоне металличности от  $-2.6$  до  $0.2$  с точными атмосферными параметрами, определено содержание углерода по линиям C I в условиях отклонения от ЛТР, а также по молекулярным линиям CN и C<sub>2</sub>. Из 57 FGK-карликов у 47 удалось измерить содержание по обоим группам линий, атомарным C I и молекулярным CN. Показано, что для каждой звезды из 47 FGK-карликов в диапазоне металличности от  $-2.5$  до  $0.2$  содержание углерода, полученное по молекулярным линиям CN согласуется с не-ЛТР содержанием по атомарным линиям C I. Это позволяет сделать важный вывод о возможности использования молекулярных линий CN в рамках плоско-параллельных моделей атмосфер для определения содержания углерода, в том числе, для звезд с низкой металличностью, где атомарные линии отсутствуют. На основе полученных результатов рекомендуется использовать атомарные C I и молекулярные CN линии в качестве дополнительного индикатора определения эффективной температуры у звезд поздних спектральных классов, в том числе в автоматических методах определения параметров. Полученное не-ЛТР содержание углерода, натрия и циркония у FGK-звезд различных галактических населений может быть использовано в качестве ограничений на модели химической эволюции Галактики.

Представлены не-ЛТР поправки к содержанию для линий C I в моделях с избытком углерода для набора параметров  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  и  $[M/H]$ . Поправки будут полезны для определения содержания углерода у звезд с избытком углерода.

**В Главе 4 "Не-ЛТР содержание натрия у карликов и красных гигантов различных населений Галактики"** разработана модель атома натрия с использованием современных атомных данных. В согласии с предыдущими исследователями показано, что основной механизм отклонения от ЛТР для Na I это сверхрекомбинация, когда нижние уровни Na I оказываются перезаселенными относительно ЛТР населенностей благодаря рекомбинациям на высоковозбужденные состояния с последующими каскадными переходами на нижние уровни. Рассмотрены механизмы отклонения от ЛТР для Na I, приведен анализ линий Na I на Солнце. Показано, что отклонения от ЛТР необходимо учитывать даже при использовании слабых линий Na I 6154, 6161 Å. Не-ЛТР поправки для Na I 6154, 6161 Å варьируются от  $-0.06$  до  $-0.24$  dex в зависимости от параметров звезды. По спектрам высокого разрешения у 78 красных GK-гигантов и 51 FGK-карлика,

принадлежащих различным населением Галактики, определено не-ЛТР содержание натрия. На основе анализа (U, V, W) скоростей и относительно содержания  $[\alpha/\text{Fe}]$  были выделены 4 подгруппы звезд-гигантов: тонкий диск (38 звезд, из которых 15 бариевые), толстый диск (15 звезд), поток Геркулеса (13 звезд) и переходные звезды (13 звезд). Среди FGK-карликов тонкий галактический диск составляют 27 звезд с  $[\text{Fe}/\text{H}]$  до  $-0.78$ , толстый диск представляют 11 звезд, а также 19 звезд гало.

Благодаря учету не-ЛТР эффектов удалось показать, что отношение  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  у красных гигантов тонкого и толстого дисков совпадает и близко к солнечному. Также не обнаружено различий в относительном содержании  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  между карликами толстого и тонкого дисков, и полученные отношения близки к солнечному значению. Звезды потока Геркулеса показывают близкие к солнечному отношения  $[\text{Na}/\text{Fe}]$ .

**В Главе 5 "Наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики"** у выборки звезд, включающей 51 FGK-карлик в диапазоне металличности от  $-2.6$  до  $0.2$  с точными атмосферными параметрами, определено содержание циркония с учетом отклонения от ЛТР.

Выполнен анализ элементных отношений  $[\text{C}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Na}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{C}/\text{Na}]$ ,  $[\text{C}/\text{O}]$ ,  $[\text{Zr}/\text{Fe}]$  и  $[\text{Zr}/\text{Sr}]$  и проведено сравнение полученных наблюдательных данных с результатами моделирования химической эволюции Галактики (K15) из [53]. Отношения  $[\text{C}/\text{Fe}]$  показывают разброс для звезд гало, но разброс уменьшается для отношения  $[\text{C}/\text{O}]$ . Подтверждено существование локального минимума в  $[\text{C}/\text{O}]$  на металличности  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$ . Отношение  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  у карликов толстого и тонкого дисков совпадает и близко к солнечному, при этом отмечается разброс у звезд гало. Отношение  $[\text{Zr}/\text{Fe}]$  растет с уменьшением металличности и достигает  $[\text{Zr}/\text{Fe}] \sim 0.5$  у звезд гало. Полученные результаты помогут восстановить картину обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами и будут полезны как наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики. Представлено сравнение полученных наблюдательных данных с результатами моделирования химической эволюции Галактики (K15) из [53]. Наиболее интересным представляется сравнение циркония со стронцием, поскольку они оба являются легкими элементами нейтронных захватов и могут синтезироваться в s- и r- процессах. У звезд тонкого диска отношение  $[\text{Zr}/\text{Sr}]$  близко к нулю, у звезд толстого диска  $[\text{Zr}/\text{Sr}] = 0.18 \pm 0.10$ , а затем наблюдается рост вплоть до  $0.8$  на  $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5$ . Полученные результаты помогут восстановить картину обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами и будут полезны как наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики.

**В Заключение** кратко повторяются полученные результаты.

## Литература

1. Carlsson M., Rutten R. J., Shchukina N. G. The formation of the MG I emission features near 12 microns // *Astronom. and Astrophys.* 1992. — Jan. Vol. 253. Pp. 567–585.
2. Sigut T. A. A. The interpretation of Mn II emission from late-type B stars // *Astronom. and Astrophys.* 2001. — Oct. Vol. 377. Pp. L27–L30.
3. Nieva M. F., Przybilla N. Carbon abundances of early B-type stars in the solar vicinity. Non-LTE line-formation for C II/III/IV and self-consistent atmospheric parameters // *Astronom. and Astrophys.* 2008. — Apr. Vol. 481. Pp. 199–216.
4. Wahlgren G. M. Weak emission lines and peculiar stars // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso.* 2008. — Apr. Vol. 38. Pp. 279–284.
5. Fossati L., Ryabchikova T., Bagnulo S. et al. The chemical abundance analysis of normal early A- and late B-type stars // *Astronom. and Astrophys.* 2009. — Sep. Vol. 503. Pp. 945–962.
6. Asplund M. New Light on Stellar Abundance Analyses: Departures from LTE and Homogeneity // *Annual Review of Astronomy and Astrophys.* 2005. — Sep. Vol. 43. Pp. 481–530.
7. Roby S. W., Lambert D. L. Carbon, nitrogen, and oxygen abundances in the chemically peculiar stars of the upper main sequence // *Astrophys. J. Suppl.* 1990. — May. Vol. 73. Pp. 67–102.
8. Przybilla N., Butler K., Kudritzki R. P. Non-LTE line-formation for neutral and singly-ionized carbon. Model atom and first results on BA-type stars // *Astronom. and Astrophys.* 2001. — Dec. Vol. 379. Pp. 936–954.
9. Rentzsch-Holm I. Non-LTE abundance corrections of iron and carbon in A-type and related stars. // *Astronom. and Astrophys.* 1996. — Aug. Vol. 312. Pp. 966–972.
10. Nieva M.-F., Przybilla N. Present-day cosmic abundances. A comprehensive study of nearby early B-type stars and implications for stellar and Galac-

- tic evolution and interstellar dust models // *Astronom. and Astrophys.* 2012. — Mar. Vol. 539. P. A143.
11. Bensby T., Feltzing S. The origin and chemical evolution of carbon in the Galactic thin and thick discs\* // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* 2006. — Apr. Vol. 367. Pp. 1181–1193.
  12. Reddy B. E., Lambert D. L., Allende Prieto C. Elemental abundance survey of the Galactic thick disc // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* 2006. — Apr. Vol. 367. Pp. 1329–1366.
  13. Akerman C. J., Carigi L., Nissen P. E. et al. The evolution of the C/O ratio in metal-poor halo stars // *Astronom. and Astrophys.* 2004. — Feb. Vol. 414. Pp. 931–942.
  14. Carbon D. F., Barbuy B., Kraft R. P. et al. Carbon and nitrogen abundances in metal-poor dwarfs of the solar neighborhood // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1987. — May. Vol. 99. Pp. 335–368.
  15. Spite M., Cayrel R., Plez B. et al. First stars VI - Abundances of C, N, O, Li, and mixing in extremely metal-poor giants. Galactic evolution of the light elements // *Astronom. and Astrophys.* 2005. — Feb. Vol. 430. Pp. 655–668.
  16. Baumueller D., Gehren T. Aluminium in metal-poor stars. // *Astronom. and Astrophys.* 1997. — Sep. Vol. 325. Pp. 1088–1098.
  17. Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of the solar chromosphere. III - Models of the EUV brightness components of the quiet-sun // *Astrophys. J. Suppl.* 1981. — Apr. Vol. 45. Pp. 635–725.
  18. Shchukina N. G., Shcherbina T. G. The effects of departure from local thermodynamical equilibrium in the solar Fraunhofer spectrum - The C I 1069.5-nm infrared multiplet // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* 1990. — Apr. Vol. 6. Pp. 44–52.
  19. Stuerenburg S., Holweger H. Statistical equilibrium and photospheric abundance of carbon in the sun and in VEGA // *Astronom. and Astrophys.* 1990. — Oct. Vol. 237. Pp. 125–136.
  20. Takeda Y. Statistical equilibrium and abundances of carbon and nitrogen in the atmosphere of VEGA // "Publications of the Astronomical Society of Japan". 1992. — Dec. Vol. 44. Pp. 649–662.

21. Fabbian D., Asplund M., Carlsson M., Kiselman D. The non-LTE line formation of neutral carbon in late-type stars // *Astronom. and Astrophys.* 2006. — Nov. Vol. 458. Pp. 899–914.
22. Takeda Y., Honda S. Photospheric CNO Abundances of Solar-Type Stars // "Publications of the Astronomical Society of Japan". 2005. — Feb. Vol. 57. Pp. 65–82.
23. Tomkin J., Lemke M., Lambert D. L., Sneden C. The carbon-to-oxygen ratio in halo dwarfs // *Astronom. J.* 1992. — Oct. Vol. 104. Pp. 1568–1584.
24. Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J. et al. Line formation in solar granulation. VI. [C I], C I, CH and C<sub>2</sub> lines and the photospheric C abundance // *Astronom. and Astrophys.* 2005. — Feb. Vol. 431. Pp. 693–705.
25. Dobrovolskas V. Effects of convection and non-equilibrium radiation transfer in stellar atmospheres. Vilnius university, Center for physical sciences and technology. Doctoral dissertation. 2013.
26. Dobrovolskas V., Kučinskas A., Steffen M. et al. Three-dimensional hydrodynamical CO<sup>5</sup>BOLD model atmospheres of red giant stars. III. Line formation in the atmospheres of giants located close to the base of the red giant branch // *Astronom. and Astrophys.* 2013. — Nov. Vol. 559. P. A102.
27. Gallagher A. J., Caffau E., Bonifacio P. et al. An in-depth spectroscopic examination of molecular bands from 3D hydrodynamical model atmospheres. I. Formation of the G-band in metal-poor dwarf stars // *Astronom. and Astrophys.* 2016. — Sep. Vol. 593. P. A48.
28. Woosley S. E., Weaver T. A. The Evolution and Explosion of Massive Stars. II. Explosive Hydrodynamics and Nucleosynthesis // *Astrophys. J.* 1995. — Nov. Vol. 101. P. 181.
29. Denisenkov P. A., Denisenkova S. N. Correlation Between the Abundances of NA and the CNO Elements in Red Giants in Omega-Centauri // *Soviet Astronomy Letters.* 1990. — Jul. Vol. 16. P. 275.
30. Reddy B. E., Tomkin J., Lambert D. L., Allende Prieto C. The chemical compositions of Galactic disc F and G dwarfs // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* 2003. — Mar. Vol. 340. Pp. 304–340.
31. Bensby T., Feltzing S., Lundström I. Elemental abundance trends in the Galactic thin and thick disks as traced by nearby F and G dwarf stars // *Astronom. and Astrophys.* 2003. — Nov. Vol. 410. Pp. 527–551.

32. Alves-Brito A., Meléndez J., Asplund M. et al. Chemical similarities between Galactic bulge and local thick disk red giants: O, Na, Mg, Al, Si, Ca, and Ti // *Astronom. and Astrophys.* 2010. — Apr. Vol. 513. P. A35.
33. Pakhomov Y. V. Chemical composition of the atmospheres of red giants with high space velocities // *Astronomy Letters.* 2012. — Feb. Vol. 38. Pp. 101–116.
34. Pakhomov Y. V. Sodium in the atmospheres of thick-disk red giants // *Astronomy Letters.* 2013. — Jan. Vol. 39. Pp. 54–64.
35. Boyarchuk A. A., Antipova L. I., Boyarchuk M. E., Savanov I. S. A Comparative Analysis of Chemical Abundances in the Atmospheres of Red Giants of Different Age Groups // *Astronomy Reports.* 2001. — Apr. Vol. 45. Pp. 301–308.
36. Pasquini L., Randich S., Zoccali M. et al. Detailed chemical composition of the open cluster IC 4651: The iron peak,  $\alpha$  elements, and Li // *Astronom. and Astrophys.* 2004. — Sep. Vol. 424. Pp. 951–963.
37. Fuhrmann K. Nearby stars of the Galactic disk and halo // *Astronom. and Astrophys.* 1998. — Oct. Vol. 338. Pp. 161–183.
38. Gehren T. Kinetic equilibrium and line formation of Na I in the solar atmosphere // *Astronom. and Astrophys.* 1975. — Jan. Vol. 38. Pp. 289–302.
39. Boyarchuk A. A., Lyubimkov L. S., Sakhbullin N. A. Effects of deviations from local thermodynamic equilibrium in the atmospheres of F supergiants. I. Overionization of Fe I atoms // *Astrophysics.* 1985. — Mar. Vol. 22. Pp. 203–214.
40. Mashonkina L. I., Sakhbullin N. A., Shimanskij V. V. NaI spectral lines in the atmospheres of G-dwarfs in the absence of LTE // *Астрон. Журн.* 1993. — Apr. Vol. 70. Pp. 372–380.
41. Baumüller D., Butler K., Gehren T. Sodium in the Sun and in metal-poor stars // *Astronom. and Astrophys.* 1998. — Oct. Vol. 338. Pp. 637–650.
42. Gratton R. G., Sneden C., Carretta E., Bragaglia A. Mixing along the red giant branch in metal-poor field stars // *Astronom. and Astrophys.* 2000. — Feb. Vol. 354. Pp. 169–187.

43. Takeda Y., Zhao G., Takada-Hidai M. et al. Non-LTE Analysis of the Sodium Abundance of Metal-Poor Stars in the Galactic Disk and Halo // Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics. 2003. — Aug. Vol. 3. Pp. 316–340.
44. Shi J. R., Gehren T., Zhao G. Sodium abundances in nearby disk stars // Astronom. and Astrophys. 2004. — Aug. Vol. 423. Pp. 683–691.
45. Lind K., Asplund M., Barklem P. S., Belyaev A. K. Non-LTE calculations for neutral Na in late-type stars using improved atomic data // Astronom. and Astrophys. 2011. — Apr. Vol. 528. P. A103.
46. Travaglio C., Gallino R., Arnone E. et al. Galactic Evolution of Sr, Y, And Zr: A Multiplicity of Nucleosynthetic Processes // Astrophys. J. 2004. — Feb. Vol. 601. Pp. 864–884.
47. Sigut T. A. A., Landstreet J. D., Shorlin S. L. S. Emission Lines in the Spectrum of the  $^3\text{He}$  Star 3 Centauri A // Astrophys. J. 2000. — Feb. Vol. 530. Pp. L89–L92.
48. Wahlgren G. M., Hubrig S. Emission lines in the spectra of late-B type stars // Astronom. and Astrophys. 2000. — Oct. Vol. 362. Pp. L13–L16.
49. Wahlgren G. M., Hubrig S. Emission lines in the optical spectrum of 3 Cen A // Astronom. and Astrophys. 2004. — May. Vol. 418. Pp. 1073–1081.
50. Castelli F., Hubrig S. A refined analysis of the remarkable Bp star HR 6000 // Astronom. and Astrophys. 2007. — Dec. Vol. 475. Pp. 1041–1052.
51. Butler K., Giddings J. // Newsletter on the analysis of astronomical spectra. 1985. Vol. No. 9. P. University of London.
52. Rybicki G. B., Hummer D. G. An accelerated lambda iteration method for multilevel radiative transfer. I - Non-overlapping lines with background continuum // Astronom. and Astrophys. 1991. — May. Vol. 245. Pp. 171–181.
53. Kobayashi C., Tsujimoto T., Nomoto K. The History of the Cosmic Supernova Rate Derived from the Evolution of the Host Galaxies // Astrophys. J. 2000. — Aug. Vol. 539. Pp. 26–38.