

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Ситнова Татьяна Михайловна

**Разработка не-ЛТР методов определения
фундаментальных параметров и химического состава
атмосфер звёзд спектральных классов от В до К**

01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в отделе нестационарных звёзд и звёздной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки (ФГБУН) Института астрономии Российской академии наук, а также на кафедре астрофизики и звёздной астрономии физического Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители: Машонкина Людмила Ивановна, доктор физико-математических наук, заведующая отделом нестационарных звёзд и звёздной спектроскопии ФГБУН Института астрономии РАН;

Черепашук Анатолий Михайлович, академик РАН, директор Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга ФГБОУ ВПО Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: Лившиц Моисей Айзикович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник гелиофизической лаборатории ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН.

Сахибуллин Наиль Абдуллович, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель отделения астрофизики и космической геодезии Института физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Казанский федеральный университет".

Ведущая организация: ФГБУН Крымская астрофизическая обсерватория РАН.

Защита состоится 20 октября 2016 года на заседании диссертационного совета Д 501.001.86 при Государственном астрономическом институте имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова, расположенном по адресу: 119991, Москва, Университетский проспект, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ МГУ.

Автореферат разослан 30 июня 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета



доктор физико-математических наук

С.О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность работы

За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в точности определения физических параметров и химического состава звезд благодаря запуску новых телескопов, оснащённых спектрографами высокого разрешения, а также усовершенствованию методов расчета теоретического спектра. Изучение содержания элементов у звезд поздних спектральных классов с разным содержанием металлов помогает понять, как происходила химическая эволюция Галактики. Изучение звезд с $[\text{Fe}/\text{H}]^1 > -1$ показывает, соотношения каких химических элементов могут быть использованы для исследования химико-динамической эволюции Галактического диска [1, 2], а также для разделения звезд толстого и тонкого диска [3–11]. Исследование звезд с большим дефицитом металлов ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2$) помогает понять процессы, ответственные за начальное обогащение среды металлами [12–15]. Элементные соотношения у звезд с разной металличностью – это главные наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики [16–18]. Лучше всего для сравнения модельных предсказаний с наблюдениями подходит выборка звезд в широком диапазоне металличности, у которой содержание ключевых химических элементов определено общими и как можно более точными методами. Действующие спектральные обзоры получают огромное количество наблюдений, улучшая статистику определения параметров и содержания элементов. В проекте Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE) [19], получено 10^5 спектров красных гигантов в инфракрасной (ИК) области с разрешением $R = \lambda/\Delta\lambda \simeq 22\,500$. Спектральный обзор Gaia-ESO [20–22] нацелен на получение спектров высокого качества в оптическом диапазоне для 10^5 звезд с помощью спектрографа FLAMES на VLT. Спектры для 10^6 звёзд планируют получить в результате запуска проекта HERMES (GALAH) [23]. С целью дополнения данных со спутника Gaia² о лучевых скоростях и расстояниях планируется получить спектры с $R = 20\,000$ для $2.5 \cdot 10^7$ звёзд в проекте 4MOST (4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope, [24]) и WEAVE [25]. Обработка спектральных наблюдений, определение параметров атмосфер и химического

¹ Здесь и далее используется стандартное обозначение $[\text{X}/\text{H}] = \log(N_{\text{X}}/N_{\text{H}})_{*} - \log(N_{\text{X}}/N_{\text{H}})_{\odot}$, где N_{X} и N_{H} - концентрации частиц элемента X и H, соответственно.

² <http://sci.esa.int/gaia/>

состава для такого большого количества объектов может быть проведена только автоматическими методами, например, с помощью программ SME [26], iSpec [27], Kea [28].

Для тестирования автоматических методов необходимо иметь выборку звёзд в широком диапазоне металличности с хорошо известными параметрами атмосфер и химическим составом. В настоящее время существует огромное количество работ, в которых для выборок звёзд Галактики определены параметры атмосфер и химический состав на основе спектров высокого разрешения. Согласно данным обновлённой версии каталога PASTEL [29], составленного по данным, опубликованным к февралю 2016 года, существует 64082 определения параметров атмосфер для 31401 звезды, опубликованные 1142 работах! То есть, каждый год, в среднем, выходит тридцать работ по определению параметров атмосфер. Здесь мы обращаем внимание на некоторые из них.

Для тестирования автоматических методов определения параметров в рамках проекта Gaia Хайтер и др. [30] отобрали 34 звезды-стандарта спектрального класса F-M с $-2.64 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.35$ и определили параметры их атмосфер. В этой выборке 5 звёзд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$, и 3 из них (HD 103095, HD 140283 и ψ Phe) не рекомендованы для тестирования методов определения параметров из-за расхождения между эффективной температурой, полученной спектроскопическим и фотометрическим методом. С целью дополнить выборку звезд-стандартов Хокинс и др. [31] определили параметры атмосфер ещё для 5 звёзд с $-1.3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ теми же методами, что и в работе Хайтер и др. [30]. Эффективные температуры получены методом ИК потока, ускорение силы тяжести – с помощью эволюционных треков, $[\text{Fe}/\text{H}]$ – по линиям Fe I и Fe II с учётом отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР), согласно Линд и др. [32].

Для изучения химической эволюции Галактики Фурманном [4] составлена хорошая выборка FG звёзд-карликов с $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.4$, определены параметры атмосфер и содержание ключевых химических элементов. Эффективная температура получена по крыльям бальмеровских линий, ускорение силы тяжести по крыльям линии Mg Ib, металличность – по линиям Fe II. При определении T_{eff} профили водородных линий рассчитывались согласно теории уширения из работ [33, 34], которая позднее была ревизована Барклемом и др. [35], что привело к понижению эффективных температур на 100 К. Параметры атмо-

сфер определены в ЛТР, что допустимо для выбранного им метода и выборки звёзд.

Для массового определения параметров автоматическими методами спектроскопический метод, основанный на анализе ширины крыльев сильных линий не подойдёт, поскольку требует хорошей нормировки непрерывного спектра. Для таких целей подходит анализ линий двух стадий ионизации, например, Fe I и Fe II. Качественное повышение точности метода определения параметров атмосфер по линиям Fe I и Fe II, особенно у звёзд с дефицитом металлов, стало возможным начиная с 2011 года, когда были разработаны не-ЛТР методы анализа линий железа на основе моделей атома Fe I, учитывающих уровни высокого возбуждения [36], [37]. Бенсби и др. [11] определили параметры для 714 карликов по линиям Fe I и Fe II с учётом отклонений от ЛТР, путём прибавления не-ЛТР поправок к содержанию из [32]. Они получили лишь небольшой сдвиг в параметрах между не-ЛТР и ЛТР, например, в среднем, $\log g$ в не-ЛТР выше всего на 0.012 ± 0.059 , чем в ЛТР. Для ближайших звезд с точными параллаксами, с $\log g > 4.2$ и $T_{\text{eff}} < 5650$ К Бенсби и др. [11] получили, что ионизационное равновесие не выполняется при $\log g$, вычисленному по параллаксу. Из этого Бенсби и др. [11] сделали вывод о том, что классические одномерные модели атмосфер имеют ограничения и неприменимы для звезд с $\log g > 4.2$ и $T_{\text{eff}} < 5650$ К. В работе Бенсби и др. [11] разница между ЛТР и не-ЛТР невелика, поскольку большинство звезд выборки имеет металличность $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.2$, где не-ЛТР поправки для линий Fe I не превышают нескольких сотых, как получено в работах [36] и [32]. Отклонения от ЛТР растут с понижением $[\text{Fe}/\text{H}]$ [38]. Для выборки звёзд из обзора RAVE Рухти и др. [39] определили параметры по линиям Fe I и Fe II также с использованием не-ЛТР поправок из работы [32]. Для одной и той же эффективной температуры они получили разницу в ускорении силы тяжести до 0.3 dex между ЛТР и не-ЛТР для звезд с $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.5$. В литературе нет общего мнения насчет надёжности определения температуры по линиям Fe I с разной энергией возбуждения. Например, для выборки холодных гигантов с большим дефицитом металлов Керель и др. [13] получили согласие между фотометрическими температурами и теми, что получены по линиям Fe I при ЛТР. Из аналогичного сравнения Фребель и др. [40] получили по линиям Fe I на сто с лишним градусов более низкую температуру по сравнению с фотометрической.

Из методов, доступных для определения параметров атмосфер не слишком больших выборок звёзд в широком диапазоне металличности, наиболее надёжными сейчас считаются метод ИК потока для T_{eff} и $\log g$, вычисленный с использованием тригонометрического параллакса, или же полученный из ионизационного равновесия Fe I/Fe II в не-ЛТР, если ошибка параллакса ведёт к ошибке в $\log g$, больше 0.1 dex. Мы отмечаем, что в литературе к 2015 году не было работы, в которой для выборки звёзд в широком диапазоне металличности T_{eff} была бы определена методом ИК потоков, а $\log g$ вычислен по параллаксам и проверен по линиям Fe I и Fe II в не-ЛТР.

Для получения точных элементных отношений для проверки моделей химической эволюции Галактики необходимы не только спектры высокого качества и точные параметры атмосфер, но и надёжные методы определения содержания элементов. Работ по определению содержания элементов существует ещё больше, чем по определению параметров атмосфер. Поскольку в этой работе мы определяем содержание кислорода и титана, то здесь мы упоминаем некоторые из работ, где определяли содержание этих элементов.

Качественно и количественно процесс обогащения Галактики кислородом достаточно понятен, и, в общем, модели химической эволюции Галактики описывают наблюдательные данные для [O/Fe]. В настоящее время пытаются установить более тонкие детали в поведении [O/Fe], например, понять, каков реальный разброс в [O/Fe] у звёзд с близкой металличностью, из чего можно сделать вывод о перемешивании вещества в Галактике. Такую попытку предприняли Бертран и др. [41] определив содержание кислорода по линиям OH в инфракрасной области спектра у красных гигантов с металличностью $-0.65 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.25$. Рамирез и др. [42] определили содержание кислорода с учетом отклонений от ЛТР по линиям O I 7771-5 Å у выборки сотен FGK карликов с $-1.2 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.4$. Бенсби и др. [11] провели детальный анализ 13 элементов от кислорода до бария у сотен близких звёзд-карликов с $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.4$. Содержание кислорода получено по O I 7771-5 Å линиям в не-ЛТР. В обеих работах особое внимание уделяется особенностям химического состава звёзд различных подсистем Галактики (тонкий и толстый диск, гало, поток Геркулеса и Арктура). Амарши и др. [43] собрали данные из литературы по определению содержания кислорода за 2000-2015 гг. у звёзд-карликов с $-3.3 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.5$, переопределили эффективную температуру методом инфракрасного потока, и

скорректировали полученное содержание с помощью поправок, полученных с учётом гидродинамических и не-ЛТР эффектов. Амарши и др. [43] получили линейный рост $[O/Fe]$ от -0.3 до 0.6 с понижением $[Fe/H]$ от 0.5 до -0.7 , затем постоянное $[O/Fe]$ до $[Fe/H] \simeq -2.5$, а потом $[O/Fe] \simeq 0.8$.

Несмотря на то, что титан относится к элементам железного пика, из наблюдений известно, что отношение $[Ti/Fe]$ ведёт себя подобно α -элементам. То есть, у звёзд с металличностью $[Fe/H] < -1$, сформировавшихся в эпоху, когда обогащение межзвёздного газа металлами осуществлялось массивными звёздами, существует избыток титана относительно железа. О его существовании известно ещё со времён работы Валлерштейна (1962) [44], где из анализа спектрограмм в жёлтом диапазоне он обнаружил избытки Mg, Ca, Si, Ti относительно Fe для 35 звезд-карликов с $[Fe/H]$ до -2 . Позднее, на больших выборках звёзд и с использованием спектров более высокого качества этот результат был подтверждён, и получено количественное значение $[Ti/Fe]$. Магейн [45] получил $[Ti/Fe] = 0.40 \pm 0.09$ из анализа линий Ti I у карликов с $-3.0 < [Fe/H] < -1.5$. Граттон и Снеден [46] получили $[Ti/Fe] = 0.28 \pm 0.10$ по карликам и гигантам с $-2.7 < [Fe/H] < -1.1$, в этой работе авторы использовали линии основной стадии ионизации титана (Ti II) для определения содержания, чтобы минимизировать влияние не-ЛТР эффектов. Эдвардссон и др. [47] получили $[Ti/Fe] = 0.15$ из ЛТР анализа линий Ti I у карликов с $-1.0 < [Fe/H] < -0.2$. Причём, они нашли избытки $[\alpha/Fe]$ уже у звёзд с металличностью $[Fe/H] < -0.2$, что не согласуется с результатами других авторов. В диапазоне $-3.6 < [Fe/H] < -2.5$ Бонифацио и др. [48] получили $[Ti/Fe] = 0.45$ для звёзд, сходящих с главной последовательности, и на 0.20 dex более низкое отношение для гигантов, сделав вывод о том, что содержание титана у гигантов надёжнее из-за меньшего влияния гидродинамических эффектов на формирование спектральных линий. Бенсби и др. [11] получили $[Ti/Fe] = 0.26$ для звёзд-карликов с $-2.7 < [Fe/H] < -0.8$. С учётом не-ЛТР ещё никто не определял содержание титана у выборки звёзд в широком диапазоне металличности.

Несмотря на большое количество работ по определению содержания элементов, у которых внутренняя точность методов ведёт к ошибке в содержании меньше 0.1 dex для индивидуальных звёзд, отличия элементных отношений по результатам разных авторов иногда превышают 0.20 dex, а внутри одной работы тоже есть значительных разброс. Например, для звёзд с близкой металлич-

ностью $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.7$ Бенсби и др. [11] получили, что $[\text{O}/\text{Fe}]$ принимает значения от 0.4 до 0.8 dex. В их работе отношение $[\text{O}/\text{Fe}]$ получено с использованием эмпирических не-ЛТР поправок к содержанию кислорода, вычисленных согласно Бенсби и др. [49]. Нам бы хотелось выяснить, связан ли такой разброс в элементных отношениях с ошибками в параметрах, методе определения содержания, или же, действительно, звёзды с близким содержанием железа отличаются содержанием других элементов.

В этой работе мы предлагаем метод определения параметров атмосфер FG-карликов на основе не-ЛТР анализа линий Fe I и Fe II с применением фотометрических данных, тригонометрических параллаксов, эволюционных треков. Метод протестирован на 20 звёздах с $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$, и определены параметры атмосфер ещё для 31 звезды в таком же диапазоне металличности. Мы также представляем методы не-ЛТР анализа линий O I, Ti I, Ti II, основанные на самых последних и наиболее полных атомных данных. Методы протестированы на звёздах в широком диапазоне параметров от поздних В до К, и определены элементные отношения $[\text{O}/\text{Fe}]$, $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ для выборки FG-карликов.

Цель диссертационной работы

Целью работы является получение наблюдательных ограничений на модели химической эволюции Галактики. Для достижения поставленной цели решается несколько задач:

- разработка метода определения параметров атмосфер FG-карликов;
- определение параметров атмосфер выборки звёзд;
- разработка методов моделирования формирования линий кислорода и титана в неравновесных условиях звёздных атмосфер;
- определение содержания кислорода и титана у выборки звёзд в широком диапазоне металличности;

Научная новизна

Следующие основные результаты получены впервые:

- Для выборки звезд в диапазоне металличности $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$ определены параметры атмосфер на основе не-ЛТР анализа линий Fe I и Fe II. Показано, что при использовании параметров атмосферы, полученных

независимыми от спектроскопическими методами (метод инфракрасного потока для T_{eff} и $\log g$, вычисленный по тригонометрическому параллаксу со спутника Hipparcos) ионизационное равновесие Fe I/Fe II выполняется в не-ЛТР.

- Построена многоуровневая модель атома Ti I-II с учетом всех как лабораторных, так и теоретически предсказанных уровней и с применением квантово-механических сечений фотоионизации для Ti I и Ti II.
- Проведены расчёты статистического равновесия Ti I-II в атмосферах АВ-звёзд. Показано, что не-ЛТР подход позволяет согласовать содержания по двум стадиям ионизации у АВ звёзд и уменьшить разброс содержания по разным линиям внутри каждой стадии ионизации.
- Усовершенствование модели атома O I путём включения квантово-механических сечений столкновений с электронами позволило получить согласие содержания по линиям O I в видимом и инфракрасном диапазоне у звёзд спектрального класса A.
- Проведен детальный анализ содержания 22 элементов нейтронных захватов от Sr до Yb у звезды гало HD 29907 с $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.55$. Показано, что происхождение Ba-Yb у этой звезды связано с r-процессом, а вклад звезд асимптотической ветви гигантов в обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами в эпоху с $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.55$ если и был, то был незначительным, на уровне ошибки определения содержания.
- Определено не-ЛТР содержание титана у выборки звёзд с $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$.
- Получено содержание кислорода у выборки звёзд с $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$ с помощью усовершенствованной не-ЛТР методики для O I.

Научная и практическая значимость

Полученные параметры атмосфер уже применены для определения содержания 17 элементов у выборки звёзд в рамках русско-китайского проекта "Систематическое не-ЛТР исследование содержания элементов от Li до Eu у близ-

ких звёзд-карликов" [50]. Преимущество наших результатов в однородности выборки звёзд, параметрах, определённых единым методом, а также содержании, полученном с учётом отклонений от ЛТР с использованием самых современных атомных данных, что в конечном итоге ведёт к более точным элементным соотношениям и меньшему разбросу содержания элементов у звёзд с близкой металличностью по сравнению с данными из литературы. Выборка FG-карликов с хорошо определёнными параметрами может применяться для тестирования автоматических методов определения параметров атмосфер и химического состава. В работе показано, что разработанные не-ЛТР методы определения содержания по линиям O I, Ti I и Ti II применимы для звёзд в широком диапазоне параметров от поздних В до К и могут быть использованы для решения разных задач. Точное содержание титана и кислорода у FG-звёзд с $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$ подходит для сравнения с предсказаниями моделей химической эволюции Галактики. Содержание кислорода в атмосферах звезд является важной величиной не только для сценариев химической эволюции Галактики, но и теории строения и эволюции звезд. Полученное нами содержание кислорода в атмосфере Солнца на 0.09 dex превышает значение, полученное Асплундом и др. [51], но на 0.08 dex меньше того, которое нужно для согласования теоретических и наблюдаемых профилей плотности и скорости звука. Линии нейтрального и ионизованного титана наблюдаются у звезд в широком диапазоне спектральных классов, от поздних В до К, и могут служить для определения параметров звездных атмосфер спектроскопическим методом.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика определения параметров атмосфер (эффективная температура, ускорение силы тяжести, металличность, микротурбулентная скорость) для FG-карликов по линиям нейтрального и ионизованного железа (Fe I, Fe II) с учётом отклонений ЛТР, а также использованием данных фотометрии, тригонометрических параллаксов и эволюционных треков. Методика протестирована на 20 звёздах в широком диапазоне металличности, с $-2.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.1$ и параметрами атмосфер, определёнными несpectроскопическими методами.
2. Определены параметры атмосфер для 51 FG-карлика с

- $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$. При использовании эффективной температуры, полученной методом инфракрасного потока, и ускорения силы тяжести, вычисленному по тригонометрическому параллаксу со спутника Hipparcos, в не-ЛТР выполняется ионизационное равновесие Fe I/Fe II в пределах 0.06 dex.
3. Построена многоуровневая модель атома Ti I-II с учетом всех как лабораторных, так и теоретически предсказанных уровней и с применением квантово-механических сечений фотоионизации для Ti I и Ti II. Разработанный метод оттестирован в широком диапазоне параметров атмосфер.
 4. Впервые проведены не-ЛТР расчёты статистического равновесия Ti I-II для A-звёзд. Показано, что в не-ЛТР у A-B звёзд достигается согласие содержания по линиям Ti I и Ti II, уменьшается разброс содержания по линиям внутри каждой стадии ионизации.
 5. Применены квантово-механические сечения столкновений с электронами для расчёта статистического равновесия нейтрального кислорода. Усовершенствованный метод впервые был применен к звёздам спектрального класса A, и в не-ЛТР получено согласие содержания по разным линиям O I.
 6. Проведен детальный анализ содержания 22 элементов нейтронных захватов от Sr до Yb у звезды гало HD 29907. Показано, что происхождение Ba-Yb у этой звезды связано с r-процессом, а вклад звезд асимптотической ветви гигантов в обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами в эпоху с $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.55$ если и был, то был незначительным, на уровне ошибки определения содержания.
 7. Впервые определено не-ЛТР содержание титана у 50 звёзд с $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$ и уточнена зависимость $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$. Отношение $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ растёт от 0 до 0.3 dex с понижением металличности от $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.2$ до -0.8 dex и сохраняется неизменным на меньших $[\text{Fe}/\text{H}]$, что говорит о связи синтеза титана с α -процессом.
 8. Определено содержание кислорода у 46 звёзд с $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$ с помощью усовершенствованного метода. Уточнена зависимость $[\text{O}/\text{Fe}]$ от

[Fe/H]. Подтверждено поведение кислорода как α -элемента с величиной избытка $[O/Fe] = 0.61 \pm 0.05$ dex при $[Fe/H] < -0.9$ dex.

Публикации по теме диссертации

Соискатель имеет 13 опубликованных работ, из них по теме диссертации – 9 научных работ, 7 из которых опубликовано в рецензируемых научных изданиях, которые включены в перечень журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. **Sitnova, T.**; Zhao, G.; Mashonkina, L.; Chen, Y.; Liu, F.; Pakhomov, Yu.; Tan, K.; Bolte, M.; Alexeeva, S.; Grupp, F.; Shi, J.-R.; Zhang, H.-W., Systematic Non-LTE Study of the $-2.6 < [Fe/H] < 0.2$ 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).
2. **Sitnova, T.**, Mashonkina L., Ryabchikova, T., A non-LTE line formation for neutral and singly ionised titanium in model atmospheres of the reference A-K stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, в печати, (2016).
3. 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*, 456 (2): 1221-1234, (2015).
4. **Ситнова Т. М.**, Машонкина Л. И., Рябчикова Т. А., Влияние отклонений от ЛТЭ на определение содержания кислорода в атмосферах звезд спектральных классов А-К, *Письма в Астрономический Журнал*, 39, 2, с.126-140, (2013).
5. **Ситнова Т. М.**, Машонкина Л. И., Вклад г- и s -процессов в содержание тяжёлых элементов у звезды гало HD 29907, *Письма в Астрономический Журнал*, том 37, No 7, с. 525–544, (2011).
6. **Ситнова Т. М.**, Эволюция содержания титана и кислорода по наблюдениям FGK карликов в широком диапазоне металличности, *Письма в Астрономический Журнал*, том 42, в печати, (2016).

7. Машонкина Л. И., **Ситнова Т. М.**, Пахомов Ю. В., Влияние отклонений от LTE на определение содержания кальция, титана и железа у холодных гигантов разной металличности, Письма в *Астрономический Журнал*, том 42, в печати, (2016).

По теме диссертации 2 работы опубликованы в материалах международных конференций и симпозиумов:

1. **Sitnova, T.**, Mashonkina L., Ryabchikova T., Pakhomov, Y., Influence of departures from LTE on oxygen and calcium abundance determination in the atmospheres of A-K stars., *Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars*, 151-156, (2014).
2. **Sitnova, T.**, Mashonkina L., Zhao G., Ryabchikova T., Pakhomov, Y., Influence of Departures from LTE on Oxygen Abundance Determination in the Atmospheres of A - K stars, *Setting the scene for Gaia and LAMOST, IAU Symposium 298*, 387-393, (2014).

Апробация работы

Результаты диссертации были представлены в качестве устных и стендовых докладов:

- на конференциях:
 - «Frontiers of Spectroscopy» (MPIA, Гейдельберг, Германия, 27-30 апреля 2015);
 - «Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today» (Санкт-Петербург, 21-25 сентября 2015 г.);
 - 298 симпозиум МАС «Setting the scene for Gaia and LAMOST» (Лицзян, Китай, 20-24 мая 2013 г.);
 - «Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars» (Москва, Россия, 3-7 июня 2013 г.);
 - «SCOPE5 Workshop on Heavy elements in galactic chemical evolution and NLTE effects» (Москва, Россия, 9-10 сентября 2013 г.);
 - «The Evolution of the First Stars in Dwarf Galaxies» (Берн, Швейцария, 18-20 декабря 2013 г.);
 - «Звёздные атмосферы: формирование спектров, химический состав, магнитные поля» (Санкт-Петербург, 24-26 июня 2014 г.);
 - «Звездные атмосферы: параметры звезд, химический состав, магнитные поля» (Научный, АР Крым, 11-13 июня 2012 г.);
- на конкурсе молодых ученых Института астрономии РАН в ноябре 2013, 2014, 2015 гг., а также на астрофизических семинарах:
 - обсерватории Упсальского университета (Упсала, Швеция, 26 ноября 2013 г.);
 - Национальных Астрономических Обсерваторий Китая (Пекин, Китай, 8 октября 2014 г.);
 - ИНАСАН, 14 января 2016 г.

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают результаты, полученные соискателем. В работе 1 соискателем проведены не-ЛТР расчёты для Fe I-II, измерение и анализ содержания по линиям железа, выбор параметров моделей атмосфер и их проверка с помощью эволюционных треков. В работе 3 соискателем проведены не-ЛТР расчёты для Ti I-II и рассчитаны не-ЛТР поправки к содержанию титана по отдельным линиям для звёзд выборки. В работе 5 содержание всех элементов, кроме свинца определено соискателем. В работах 2, 4, 6 соискателем получены результаты и написан текст. В работе 7 соискателем рассчитаны не-ЛТР поправки к содержанию для линий титана.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Всего в диссертации содержится 26 таблиц и 37 рисунков. Общий объем диссертации составляет 166 страниц. Библиография включает в себя 277 наименований.

Содержание работы

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

В **Главе 1** «Спектроскопический анализ звёздных атмосфер» описан метод синтетического спектра, используемые в работе модели атмосфер и программы для не-ЛТР расчётов и расчётов теоретических спектров. Также в этой главе кратко описаны некоторые методы определения параметров атмосфер F-K звёзд.

В **Главе 2** «Определение параметров атмосфер FG-карликов на основе не-ЛТР анализа линий Fe I, Fe II» представлен разработанный метод определения T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, ξ_t , основанный на фотометрии, тригонометрических параллаксах, эволюционных треках, а главное, не-ЛТР анализе содержания по разным линиям Fe I, Fe II. Определены параметры атмосфер для выборки близких к Солнцу FGK-карликов, равномерно распределённых по металличности в

пределах $-2.60 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.20$. Эффективная температура, ускорение силы тяжести, металличность, микротурбулентная скорость определены с помощью линий нейтрального (Fe I) и ионизованного железа (Fe II) с учётом отклонений от ЛТР. Спектроскопический метод был протестирован на 20 звёздах-стандартах, эффективная температура которых определена методом ИК потока в нескольких независимых работах, а ошибка в тригонометрическом параллаксе не превышает 10 %. Затем, были определены параметры атмосфер ещё для 31 звезды. Для всех звёзд выборки мы получили согласие в пределах 0.06 dex содержания по линиям Fe I и Fe II в не-ЛТР с масштабирующим коэффициентом к скоростям неупругих столкновений с атомами водорода $S_{\text{H}+\text{Fe}} = 0.5$. Полученные параметры атмосферы для каждой звезды мы проверили путём сравнения её положения на плоскости $\log g - T_{\text{eff}}$ с эволюционными треками из работы [52]. Полученные эффективные температуры лежат между теми, что получены методом ИК потока в работах [53] и [54], со средней разницей +46 К и -51 К, соответственно. Учёт отклонений от ЛТР ведёт к более высокому $\log g$ по сравнению с ЛТР. Для звёзд с $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -0.75$, или $T_{\text{eff}} \leq 5750$ К, или $\log g \geq 4.2$ мы получили сдвиг в $\log g$ меньше 0.1 dex между не-ЛТР и ЛТР. Не-ЛТР подход особенно важен для звёзд с дефицитом металлов на стадии субгигантов, для которых сдвиг в $\log g$ между не-ЛТР и ЛТР достигает 0.5 dex.

В **Главе 3** «Разработка и тестирование не-ЛТР методов анализа линий титана и кислорода» описаны методы не-ЛТР расчётов для Ti I-II и O I и их тестирование на звёздах в широком диапазоне параметров, от поздних В до К. Впервые построена многоуровневая модель атома Ti I-II с учётом более 3600 лабораторных и теоретически предсказанных уровней Ti I и 1800 уровней Ti II с применением точных сечений фотоионизации. Модель атома протестирована на хорошо изученных звёздах спектральный классов от В до К, разных классов светимости, в широком диапазоне металличности ($-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.4$). Не-ЛТР ведёт к ослаблению линий Ti I и к более высокому содержанию по сравнению с ЛТР. Полученные отклонения от ЛТР меньше по сравнению с данными из литературы для FGК-звёзд. Отклонения от ЛТР малы для линий Ti II в атмосферах звёзд поздних спектральных классов. Для А-звёзд не-ЛТР ведёт к усилению линий Ti II. Впервые проведены не-ЛТР расчёты для Ti I-II в атмосферах с $6500 \text{ К} < T_{\text{eff}} < 13000 \text{ К}$. Для четырёх А-звёзд главной последовательности разница в ЛТР содержании, полученном по линиям Ti I и

Ti II (Ti I–Ti II), достигает 0.2 dex и исчезает при не-ЛТР. Для других четырёх звёзд, где наблюдаются только линии Ti II не-ЛТР ведёт к меньшему разбросу содержания по отдельным линиям по сравнению с ЛТР. Из анализа линий Ti I и Ti II у 17 звёзд поздних спектральных классов с $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ мы эмпирически оценили эффективность неупругих столкновений с нейтральными атомами водорода ($S_{\text{H}+\text{Ti}}$). Согласие содержания по Ti I и Ti II в не-ЛТР достигается с $S_{\text{H}+\text{Ti}} = 1$ для звёзд с $\log g > 4.1$ и с $S_{\text{H}+\text{Ti}} = 0$ для гиганта HD 122563 с $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5$. Для звёзд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ и $\log g < 4.1$ мы получили положительную разницу Ti I–Ti II уже в ЛТР, которая только возрастает в не-ЛТР. Точные столкновительные данные для Ti I и Ti II помогли бы прояснить причину этого расхождения.

Проведены не-ЛТР расчеты для O I с многоуровневой моделью атома с использованием современных атомных данных для набора параметров, соответствующих звездам спектральных классов от A до K. Отклонения от ЛТР ведут к усилению линий O I, и разница между содержанием, полученным при не-ЛТР и при ЛТР (не-ЛТР поправка), отрицательная. Не-ЛТР поправка не превышает 0.05 dex по абсолютной величине для линий O I в видимом диапазоне для звезд главной последовательности во всем диапазоне температур. Для линии O I 7771 Å в инфракрасной области спектра не-ЛТР поправка может достигать -1.9 dex. Отклонения от ЛТР усиливаются с ростом температуры и с уменьшением ускорения силы тяжести. Получено содержание кислорода для трех звезд ГП спектрального класса A с надежно определенными параметрами (Вега, Сириус, HD 32115). Для каждой из звезд учет отклонений от ЛТР ведет к уменьшению разницы содержания по ИК линиям и линиям в видимом диапазоне, например, для Веги с 1.17 dex при ЛТР до 0.14 dex при отказе от ЛТР. В случае Прокциона и Солнца неупругие столкновения с H I влияют на статистическое равновесие O I, и согласие содержания по разным линиям достигается при использовании классического формализма Дравина ($S_{\text{H}+\text{O}} = 1$). По линиям O I 6300, 6158, 7771-5, 8446 Å солнечного спектра получено среднее содержание кислорода $\log \varepsilon = 8.74 \pm 0.05$ с использованием классической плоскопараллельной модели солнечной атмосферы и $\log \varepsilon_{+3D} = 8.78 \pm 0.03$ с учетом 3D поправок, взятых из литературы.

В **Главе 4** «Получение наблюдательных ограничений на модели химической эволюции Галактики» для выборки близких к Солнцу звёзд-карликов с

содержанием железа в диапазоне $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$, параметры которых мы определили в Главе 1, определено содержание титана и кислорода с учётом отклонений от ЛТР с помощью разработанных в Главе 3 методов. Уточнена зависимость элементных отношений $[\text{O}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$ по сравнению с данными из литературы. Получено, что $[\text{O}/\text{Fe}]$ растёт от -0.2 до 0.6 с понижением металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ от 0.2 до -0.8 и сохраняет постоянное значение при более низкой металличности. Для $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ получено похожее поведение, но плато образуют звёзды с $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.7$, и избыток титана относительно железа составляет 0.3 . Полученные результаты указывают на то, что синтез титана связан с α -процессом. Наши данные могут использоваться для тестирования моделей химической эволюции Галактики.

В **Главе 4** мы также определяем содержание 22 элементов нейтронных захватов от Sr до Pb у звезды гало HD 29907 с $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.55$. В области от Ba до Yb полученное распределение содержания согласуется с аналогичными для звезд, сильно обогащенных элементами r -процесса (звезды типа r-II с $[\text{Eu}/\text{Fe}] > 1$ и $[\text{Ba}/\text{Eu}] < 0$), таких как CS 22892-052 и CS 31082-001, а также с кривой вклада r -процесса в солнечное содержание и моделью r -процесса, рассчитанной Фаруки и др. [55]. Таким образом, происхождение Ba–Yb у звезды HD 29907 связано с r -процессом. Так же, как и другие звезды с умеренным избытком элементов r -процесса, изученные в литературе, HD 29907 демонстрирует более высокое содержание Sr, Y и Zr по сравнению со звездами r-II. Эти результаты подтверждают предположение Трурана и др. [56] и Травалло и др. [57] о существовании в ранней Галактике дополнительного механизма синтеза Sr–Zr, который предшествовал нуклеосинтезу в звездах асимптотической ветви гигантов. Нет оснований предполагать присутствие s -ядер свинца в веществе исследуемой звезды, поскольку полученное для нее отношение $\log \varepsilon(\text{Pb}/\text{Eu}) = 1.20$ находится в пределах, демонстрируемых звездами сравнения: от $\log \varepsilon(\text{Pb}/\text{Eu}) = 0.17$ (CS 31082-001) до < 1.55 (HE 1219-0312). Таким образом, вклад звезд АВГ в обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами в эпоху с $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.55$ если и был, то был незначительным, на уровне ошибки определения содержания.

В **Заключении** кратко повторяются полученные результаты.

Приложение А содержит атомные данные и не-ЛТР поправки к содержанию титана по отдельным линиям, рассчитанные для сетки моделей атмосфер.

Цитированная литература

1. Edvardsson B., Andersen J., Gustafsson B. et al. The Chemical Evolution of the Galactic Disk - Part One - Analysis and Results // *Astron. and Astrophys.*— 1993.— V. 275.— P. 101.
2. Chen Y. Q., Nissen P. E., Zhao G. et al. Chemical composition of 90 F and G disk dwarfs // *Astronomy and Astrophysics Supplement.*— 2000.— V. 141.— P. 491–506.
3. Gratton R., Carretta E., Matteucci F., Sneden C. The [Fe/O] Ratio in Field Stars and the History of Star Formation of the Solar Neighbourhood // *Formation of the Galactic Halo...Inside and Out / Ed. by H. L. Morrison, A. Sarajedini.*— V. 92 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.*— 1996.— P. 307.
4. Fuhrmann K. Nearby stars of the Galactic disk and halo // *Astron. and Astrophys.*— 1998.— V. 338.— P. 161–183.
5. Fuhrmann K. Nearby stars of the Galactic disk and halo. III. // *Astronomische Nachrichten.*— 2004.— V. 325.— P. 3–80.
6. Mashonkina L., Gehren T. Barium and europium abundances in cool dwarf stars and nucleosynthesis of heavy elements // *Astron. and Astrophys.*— 2000.— V. 364.— P. 249–264.
7. Reddy B. E., Tomkin J., Lambert D. L., Allende Prieto C. The chemical compositions of Galactic disc F and G dwarfs // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*— 2003.— V. 340.— P. 304–340.
8. Mishenina T. V., Soubiran C., Kovtyukh V. V., Korotin S. A. On the correlation of elemental abundances with kinematics among galactic disk stars // *Astron. and Astrophys.*— 2004.— V. 418.— P. 551–562.
9. Zhang H. W., Zhao G. Chemical abundances of 32 mildly metal-poor stars // *Astron. and Astrophys.*— 2006.— V. 449.— P. 127–134.

10. Adibekyan V. Z., Figueira P., Santos N. C. et al. Kinematics and chemical properties of the Galactic stellar populations. The HARPS FGK dwarfs sample // *Astron. and Astrophys.*— 2013.— V. 554.— P. A44.
11. Bensby T., Feltzing S., Oey M. S. Exploring the Milky Way stellar disk. A detailed elemental abundance study of 714 F and G dwarf stars in the solar neighbourhood // *Astron. and Astrophys.*— 2014.— V. 562.— P. A71.
12. McWilliam A., Preston G. W., Sneden C., Searle L. Spectroscopic Analysis of 33 of the Most Metal Poor Stars. II. // *Astron. J.*— 1995.— V. 109.— P. 2757.
13. Cayrel R., Depagne E., Spite M. et al. First stars V - Abundance patterns from C to Zn and supernova yields in the early Galaxy // *Astron. and Astrophys.*— 2004.— V. 416.— P. 1117–1138.
14. Zhang H. W., Zhao G. Chemical abundances of very metal-poor stars // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*— 2005.— V. 364.— P. 712–724.
15. Bonifacio P., Spite M., Cayrel R. et al. First stars XII. Abundances in extremely metal-poor turnoff stars, and comparison with the giants // *Astron. and Astrophys.*— 2009.— V. 501.— P. 519–530.
16. Chiappini C., Matteucci F., Romano D. Abundance Gradients and the Formation of the Milky Way // *Astrophys. J.*— 2001.— V. 554.— P. 1044–1058.
17. Romano D., Karakas A. I., Tosi M., Matteucci F. Quantifying the uncertainties of chemical evolution studies. II. Stellar yields // *Astron. and Astrophys.*— 2010.— V. 522.— P. A32.
18. Kobayashi C., Karakas A. I., Umeda H. The evolution of isotope ratios in the Milky Way Galaxy // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*— 2011.— V. 414.— P. 3231–3250.
19. Zasowski G., Johnson J. A., Frinchaboy P. M. et al. Target Selection for the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE) // *Astron. J.*— 2013.— V. 146.— P. 81.
20. Gilmore G., Randich S., Asplund M. et al. The Gaia-ESO Public Spectroscopic Survey // *The Messenger.*— 2012.— V. 147.— P. 25–31.

21. Randich S., Gilmore G., Gaia-ESO Consortium. The Gaia-ESO Large Public Spectroscopic Survey // *The Messenger*.— 2013.— V. 154.— P. 47–49.
22. Smiljanic R., Korn A. J., Bergemann M. et al. Gaia-ESO Survey: The analysis of high-resolution UVES spectra of FGK-type stars // *ArXiv e-prints*.— 2014.
23. De Silva G. M., Freeman K. C., Bland-Hawthorn J. et al. The GALAH survey: scientific motivation // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*— 2015.— V. 449.— P. 2604–2617.
24. de Jong R. S., Bellido-Tirado O., Chiappini C. et al. 4MOST: 4-metre multi-object spectroscopic telescope // *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*.— V. 8446 of *Proceedings of the SPIE*.— 2012.— P. 84460T.— [arXiv:astro-ph.IM/1206.6885](https://arxiv.org/abs/1206.6885).
25. Dalton G., Trager S., Abrams D. C. et al. Project overview and update on WEAVE: the next generation wide-field spectroscopy facility for the William Herschel Telescope // *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*.— V. 9147 of *Proceedings of the SPIE*.— 2014.— P. 91470L.— [arXiv:astro-ph.IM/1412.0843](https://arxiv.org/abs/1412.0843).
26. Valenti J. A., Piskunov N. Spectroscopy made easy: A new tool for fitting observations with synthetic spectra. // *Astronomy and Astrophysics Supplement*.— 1996.— V. 118.— P. 595–603.
27. Blanco-Cuaresma S., Soubiran C., Jofré P., Heiter U. iSpec: An integrated software framework for the analysis of stellar spectra // *Astronomical Society of India Conference Series*.— V. 11 of *Astronomical Society of India Conference Series*.— 2014.— [arXiv:astro-ph.SR/1312.4545](https://arxiv.org/abs/1312.4545).
28. Endl M., Cochran W. D. Kea: a new tool to obtain stellar parameters from low to moderate signal/noise and high-resolution Echelle spectra // *ArXiv e-prints*.— 2016.
29. Soubiran C., Le Campion J.-F., Brouillet N., Chemin L. The PASTEL catalogue: 2016 version // *ArXiv e-prints*.— 2016.

30. Heiter U., Jofré P., Gustafsson B. et al. Gaia FGK benchmark stars: Effective temperatures and surface gravities // *Astron. and Astrophys.*— 2015.— V. 582.— P. A49.
31. Hawkins K., Jofre P., Heiter U. et al. Gaia FGK Benchmark Stars: New Candidates At Low-Metallicities // *ArXiv e-prints.*— 2016.
32. Lind K., Bergemann M., Asplund M. Non-LTE line formation of Fe in late-type stars - II. 1D spectroscopic stellar parameters // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*— 2012.— V. 427.— P. 50–60.
33. Ali A. W., Griem H. R. Theory of Resonance Broadening of Spectral Lines by Atom-Atom Impacts // *Physical Review.*— 1965.— V. 140.— P. 1044–1049.
34. Ali A. W., Griem H. R. Theory of Resonance Broadening of Spectral Lines by Atom-Atom Impacts // *Physical Review.*— 1966.— V. 144.— P. 366–366.
35. Barklem P. S., Piskunov N., O’Mara B. J. Self-broadening in Balmer line wing formation in stellar atmospheres // *Astron. and Astrophys.*— 2000.— V. 363.— P. 1091–1105.
36. Mashonkina L., Gehren T., Shi J.-R. et al. A non-LTE study of neutral and singly-ionized iron line spectra in 1D models of the Sun and selected late-type stars // *Astron. and Astrophys.*— 2011.— V. 528.— P. A87.
37. Bergemann M., Lind K., Collet R. et al. Non-LTE line formation of Fe in late-type stars - I. Standard stars with 1D and <3D> model atmospheres // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*— 2012.— V. 427.— P. 27–49.
38. Asplund M. New Light on Stellar Abundance Analyses: Departures from LTE and Homogeneity // *An. Rev. Astron. Astrophys.*— 2005.— V. 43.— P. 481–530.
39. Ruchti G. R., Bergemann M., Serenelli A. et al. Unveiling systematic biases in the 1D LTE excitation-ionization balance of Fe for FGK stars: a novel approach to determination of stellar parameters // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*— 2013.— V. 429.— P. 126–134.

40. Frebel A., Casey A. R., Jacobson H. R., Yu Q. Deriving Stellar Effective Temperatures of Metal-poor Stars with the Excitation Potential Method // *Astrophys. J.*— 2013.— V. 769.— P. 57.
41. Bertran de Lis S., Allende Prieto C., Majewski S. R. et al. Cosmic variance in [O/Fe] in the Galactic disk // *Astron. and Astrophys.*— 2016.— V. 590.— P. A74.
42. Ramírez I., Allende Prieto C., Lambert D. L. Oxygen Abundances in Nearby FGK Stars and the Galactic Chemical Evolution of the Local Disk and Halo // *Astrophys. J.*— 2013.— V. 764.— P. 78.
43. Amarsi A. M., Asplund M., Collet R., Leenaarts J. The Galactic chemical evolution of oxygen inferred from 3D non-LTE spectral-line-formation calculations // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*— 2015.— V. 454.— P. L11–L15.
44. Wallerstein G. Abundances in G. Dwarfs.VI. a Survey of Field Stars. // *Astrophys. J. Suppl.*— 1962.— V. 6.— P. 407.
45. Magain P. The chemical composition of the extreme halo stars. I - Blue spectra of 20 dwarfs // *Astron. and Astrophys.*— 1989.— V. 209.— P. 211–225.
46. Gratton R. G., Sneden C. Abundances of elements of the Fe-group in metal-poor stars // *Astron. and Astrophys.*— 1991.— V. 241.— P. 501–525.
47. Edvardsson B., Andersen J., Gustafsson B. et al. The Chemical Evolution of the Galactic Disk - Part One - Analysis and Results // *Astron. and Astrophys.*— 1993.— V. 275.— P. 101.
48. Bonifacio P., Spite M., Cayrel R. et al. First stars XII. Abundances in extremely metal-poor turnoff stars, and comparison with the giants // *Astron. and Astrophys.*— 2009.— V. 501.— P. 519–530.
49. Bensby T., Feltzing S., Lundström I. Oxygen trends in the Galactic thin and thick disks // *Astron. and Astrophys.*— 2004.— V. 415.— P. 155–170.
50. Zhao G., Mashonkina L., Chen Y. et al. // in preparation.— 2016.
51. Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Scott P. The Chemical Composition of the Sun // *An. Rev. Astron. Astrophys.*— 2009.— V. 47.— P. 481–522.

52. Yi S. K., Demarque P., Kim Y.-C. The Y^2 Isochrones // *Astron. Space Sci.*— 2004.— V. 291.— P. 261–262.
53. Alonso A., Arribas S., Martinez-Roger C. Determination of effective temperatures for an extended sample of dwarfs and subdwarfs (F0-K5). // *Astronomy and Astrophysics Supplement.*— 1996.— V. 117.— P. 227–254.
54. Casagrande L., Schönrich R., Asplund M. et al. New constraints on the chemical evolution of the solar neighbourhood and Galactic disc(s). Improved astrophysical parameters for the Geneva-Copenhagen Survey // *Astron. and Astrophys.*— 2011.— V. 530.— P. A138.
55. Farouqi K., Kratz K.-L., Pfeiffer B. et al. Charged-particle and Neutron-capture Processes in the High-entropy Wind of Core-collapse Supernovae // *Astrophys. J.*— 2010.— V. 712.— P. 1359–1377.
56. Truran J. W., Cowan J. J., Pilachowski C. A., Sneden C. Probing the Neutron-Capture Nucleosynthesis History of Galactic Matter // *PASP.*— 2002.— V. 114.— P. 1293–1308.
57. Travaglio C., Gallino R., Arnone E. et al. Galactic Evolution of Sr, Y, And Zr: A Multiplicity of Nucleosynthetic Processes // *Astrophys. J.*— 2004.— V. 601.— P. 864–884.