



УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института астрономии РАН
чл. корр. РАН, д.ф.-м.н. Бисикало Д.В.
"08" февраля 2017 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук

Диссертация **«Определение содержания углерода и натрия у звезд спектральных классов В-К с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия»** выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института астрономии РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Алексеева Софья Александровна работала в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института астрономии Российской академии наук на должности младшего научного сотрудника.

Алексеева Софья Александровна в 2005 г. окончила Уральский государственный технический университет по специальности «Прикладные математика и физика». В 2012 г. окончила Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина и получила степень магистра физики со специализацией «Астрофизика. Физика космических излучений и космоса». В период 2012 – 2016 г.г. обучалась в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институту астрономии Российской академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук Машонкина Людмила Ивановна работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института астрономии Российской академии наук на должности заведующего отделом нестационарных звезд и звездной спектроскопии.

Доклад С.А. Алексеевой по результатам диссертации **«Определение содержания углерода и натрия у звезд спектральных классов В-К с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия»**, представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия, был заслушан и обсужден на заседании Объединенного семинара Института астрономии РАН 13 октября 2016 г.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа посвящена изучению звездных атмосфер и химической эволюции Галактики с применением спектроскопических методов, учитывающих отклонения от локального термодинамического равновесия при формировании спектральных линий (или не-ЛТР метод).

Автором разработана методика расчета статистического равновесия С I-С II и проведен анализ формирования спектральных линий в условиях отклонения от локального термодинамического равновесия (ЛТР) в широком диапазоне звездных параметров. Объяснен механизм формирования эмиссионных линий С I 8335, 9405, 9061-9111, 9603-9658 Å в атмосферах четырех карликов спектрального типа В. Для четырех АВ звезд показано, что содержание углерода по линиям двух стадий ионизации – С I, включая эмиссионные линии С I, и С II совпадает при условии учета отклонений от ЛТР. 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. У выборки звезд, включающей 51 FGK-карлик в диапазоне металличности от -2.6 до 0.2 с точными атмосферными параметрами, определено содержание С, 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 $[Zr/Fe]$ растет с уменьшением металличности и достигает 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. Показано, что для каждой звезды из 47 FGK-карликов в диапазоне металличности от -2.5 до 0.2 содержание углерода, полученное по молекулярным линиям СН, согласуется с не-ЛТР содержанием по атомарным линиям С I. Это позволяет сделать важный вывод о возможности использования молекулярных линий СН в рамках плоско-параллельных моделей атмосфер для определения содержания углерода, в том числе, для звезд с низкой металличностью, где атомарные линии отсутствуют.

Актуальность исследований. Классический подход, основанный на предположении о локальном термодинамическом равновесии не позволяет достоверно интерпретировать наблюдаемые спектры звезд и может приводить к ошибочным выводам. Самым ярким примером являются эмиссионные линии различных металлов в спектрах В звезд главной последовательности, которые не могут быть воспроизведены в рамках ЛТР. При определении содержания химических элементов с использованием предположения ЛТР зачастую сталкиваются с проблемой расхождения содержания, полученного по разным линиям. Расхождение может возникать при определении содержания как по линиям одной стадии ионизации, так и по линиям разных стадий ионизации.

Физически более обоснованным является не-ЛТР подход, в котором населенности атомных уровней вычисляются путём решения системы уравнений статистического равновесия совместно с уравнением переноса излучения, в отличие от ЛТР, где населенности рассчитываются по формулам Больцмана и Саха. Не-ЛТР подход требует большого числа 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.

Личный вклад соискателя. Результаты диссертации получены лично автором или при его непосредственном участии. В список положений, выносимых на защиту, включены лишь те результаты и выводы, в которых вклад автора является основным. Форма ссылок позволяет отличать результаты, полученные лично соискателем, от результатов, полученных другими авторами.

Степень достоверности полученных результатов. Разработанные методы были протестированы на хорошо изученных звездах, и получены самосогласованные результаты. Где возможно, проведено сравнение с наиболее точными результатами других авторов и

показано удовлетворительное согласие с ними. Достоверность полученных результатов подтверждается также их публикацией в ведущих рецензируемых отечественных и международных астрономических журналах, таких как Письма в Астрономический журнал, The Astrophysical Journal, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Новизна и практическая значимость. В диссертационной работе впервые были получены следующие результаты:

Построена модель атома С I-С II с использованием современных данных о сечениях столкновений с электронами. Продемонстрирована важность применения точных данных на примере моделирования эмиссионных линий С I в атмосферах В-карликов.

Объяснен механизм формирования эмиссионных линий С I 8335, 9405, 9061-9111, 9603-9658 Å, в атмосферах четырех карликов спектрального типа В. Для тех же звезд достигнуто согласие не-ЛТР содержания по линиям двух стадий ионизации углерода, включая эмиссионные линии С I. 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 $[Na/Fe]$ у звезд толстого диска согласуется с аналогичным отношением у звезд тонкого диска и близко к солнечному.

У выборки звезд, включающей 51 FGK-карлик в диапазоне металличности от -2.6 до 0.2 с точными атмосферными параметрами, определено содержание С, Na, Zr с учетом отклонения от ЛТР. Полученные зависимости $[C/O]$, $[Na/Fe]$, $[Zr/Fe]$ и $[Zr/Sr]$ представляют интерес для изучения химической эволюции Галактики.

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

Ценность научных работ, полнота изложения. Разработанные и оттестированные модели атомов С I- С II и Na I могут быть использованы для решения различных астрофизических задач. Объяснение эмиссии в линиях С I, как проявление не-ЛТР эффектов в звездной атмосфере, может мотивировать исследование эмиссионных линий Mg II, Si II, P II, Ca II, Sr II, Fe II, Ni II, Cu II и Hg II, которые наблюдаются в спектрах В-звезд. На основе полученных результатов рекомендуется использовать атомарные С I и молекулярные СН 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 моделями химической эволюции Галактики. Основные результаты диссертации, определяющие ее практическую и научную значимость, опубликованы в авторитетных научных изданиях и используются российскими и зарубежными учеными.

Диссертация «**Определение содержания углерода и натрия у звезд спектральных классов В-К с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия**» Алексеевой Софьи Александровны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия. Заключение принято на заседании Объединенного семинара Института астрономии РАН от 13 октября 2016 г. Присутствовало на заседании 25 чел. Результаты голосования: "за" — 25 чел., "против" — 0 чел., "воздержалось" — 0 чел., протокол №1 от 13 октября 2016 г.

Секретарь Объединенного семинара ИНАСАН



к.ф.-м.н. В.В. Акимкин