

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Белова

Белова Оксана Михайловна

**Излучение водорода за фронтом ударной волны
в атмосферах холодных звёзд**

Специальность 01.03.02. — «Астрофизика и звёздная астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звёздной астрономии физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель — *Бычков Константин Вениаминович,
доктор физико-математических наук*

Официальные оппоненты — *Татарникова Анна Александровна,
кандидат физико-математических наук,
ГАИШ МГУ, отдел радиоастрономии,
старший научный сотрудник*

*Холтыгин Александр Фёдорович,
доктор физико-математических наук,
СПбГУ, математико-механический
факультет, кафедра астрономии,
профессор*

*Щёкинов Юрий Андреевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, АКЦ ФИАН,
отдел теоретической астрофизики,
главный научный сотрудник*

Защита диссертации состоится «24» октября 2019 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: whitecanvas05122010@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/211127338/>

Автореферат разослан «5» июля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических
наук



М.В. Пружинская

Общая характеристика работы

Согласно современным представлениям существенным элементом многих моделей, объясняющих возникновение эмиссии в спектрах звёзд, является высвечивание газа, нагретого ударной волной. В диссертационной работе детально рассмотрен процесс нестационарного высвечивания частично ионизованного газа позади фронта стационарной ударной волны в звёздных атмосферах. Ударная волна называется стационарной, если она движется с постоянной скоростью по однородному газу. Если представлять решение стационарной задачи в эйлеровых переменных — независимых координате и времени, то в связанной с фронтом системе отсчёта все физические величины: температура, плотность, состояние ионизации и другие, все они имеют стационарные значения в любой точке пространства в каждый момент времени. При расчёте высвечивания газа позади фронта удобно пользоваться лагранжевой координатой — промежутком времени, протекшим с момента пересечения фронта данным элементом газа. Конечно, если в системе идут процессы, меняющие состояние вещества (возбуждение, ионизация, рекомбинация и т.д.), то его характеристики — температура, плотность, состояние ионизации и др. — даже в стационарной ударной волне зависят от лагранжевой переменной и в этом смысле высвечивание является нестационарным.

Особое внимание соискатель уделила деталям расчётов в применении к условиям в двух типах объектов: вспыхивающих звёздах типа UV Кита, а также долгопериодических переменных типа Миры Кита, или миридах.

К вспыхивающим звёздам типа UV Кита относятся звёзды главной последовательности спектральных классов G–M, у которых обнаружена активность солнечного типа. Вспышки происходят в результате быстрого освобождения энергии магнитного поля высоко над фотосферой, где газ прозрачен в частотах непрерывного спектра.

Долгопериодические переменные типа Миры Кита относятся к классу пульсирующих переменных, которые находятся на стадии асимптотической ветви гигантов. Абсорбционные линии молекул в спектрах их разреженных атмосфер не перекрываются, следовательно, между линиями остаются значительные участки, не испытывающие поглощения. Поэтому к миридам в первом приближении также применяют модель газа, прозрачного в континууме.

Особенность ударной волны, движущейся в среде, прозрачной в частотах непрерывного спектра, заключается в создании неравновесной ситуации, когда нагретый на фронте газ практически сохраняет состояния ионизации и возбуждения, соответствующие его низкой температуре перед вязким скачком. Неравновесность усиливается тем, что позади фронта нет единого для всех компонент значения температуры: на вязком скачке энергия направленного движения передаётся в основном тяжёлой

компоненте плазмы — ионам и атомам, в то время как электроны нагреваются только путём адиабатического сжатия. Поэтому за фронтом образуется двухтемпературная среда, состоящая из относительно холодных электронов и горячих тяжёлых частиц. Неравновесные начальные условия вызывают нестационарные процессы высвечивания позади фронта. Нестационарность заключается в том, что состояние ионизации и возбуждения оттекающего от фронта газа определяются не только мгновенными значениями температуры и концентрации компонент, но и всей предысторией процесса. Такая ситуация имеет место, например, в межзвёздной среде и в надфотосферных слоях звёзд, включая хромосферу.

Впервые расчёт нестационарного высвечивания ударной волны с учётом указанных выше факторов был выполнен Пикельнером [1] для условий межзвёздной среды, что позволило ему объяснить механизм свечения системы волокон Петли Лебеда, рядом с которой нет горячей звезды.

Впоследствии высвечивание ударных волн связали с появлением эмиссионных линий в спектрах звёзд и Солнца, что привело к необходимости развития теории. В отличие от разреженной межзвёздной среды в плотных звёздных атмосферах газ оказывается непрозрачным не только в линиях резонансных, но и субординатных переходов. Это приводит к возрастанию роли возбуждённых уровней, причём вклад дискретного состояния в процессы ионизации и возбуждения может увеличиваться по мере увеличения главного квантового числа. Поэтому в случае звёздных атмосфер необходимо учитывать полное число дискретных уровней. Так по наблюдениям эмиссионных линий в бальмеровской серии в карликах реализуется до пятнадцати, а в гигантах порядка 25–30 уровней атома водорода. Эти значения согласуются с критерием Инглиса–Теллера.

Первые расчёты по высвечиванию ударных волн в атмосфере звезды были выполнены Горбацким [2] в отношении долгопериодических переменных типа Миры Кита. Он рассмотрел задачу, в которой «... по оболочке, в которой водород первоначально находится в нейтральном состоянии, начиная с момента минимума блеска звезды, распространяется ударная волна со скоростью v , возрастающей до максимума блеска и уменьшающейся после максимума блеска» [2, с. 258]. В своих расчётах Горбацкий принял во внимание, что в отличие от межзвёздной среды в атмосфере звезды существенную роль играют возбуждённые состояния вследствие непрозрачности газа в линиях. Рассеяние учитывалось в рамках двухуровневой модели. Главным итогом его работы был вывод о принципиальной возможности объяснить эмиссионные линии в миридах в рамках гипотезы ударной волны. Также он оценил время высвечивания газа в бальмеровском континууме в несколько месяцев.

Дальнейшие работы по высвечиванию ударных волн в звёздных атмосферах проводились в тех или иных приближениях. Так Whitney & Skalafuris [3] и Skalafuris [4] решали задачу о прохождении

ударной волны по атмосфере переменной звезды типа W Wyr. В своих расчётах однотемпературной модели они рассмотрели чисто рекомбинационное излучение, полагая его полностью оптически прозрачным, а линии непрозрачными. Модель атома водорода включала только одно возбуждённое состояние помимо основного и континуума. В опубликованной статье Якубова [5] было отмечено, что лаймановский континуум за фронтом является непрозрачным.

Задачу о высвечивании ударных волн, возникающих на протозвёздах, рассмотрел Narita [6]. Согласно его модели ударная волна движется по атмосфере из чистого водорода. Расчёты проводились в двухтемпературном приближении. Он отметил, что газ за фронтом не является ни прозрачным, ни непрозрачным для излучения, откуда следует необходимость решения уравнения переноса [6, с. 1917]. В рамках атома водорода, включающего два дискретных уровня и континуум, Narita получил, что 80 – 90% излучения ударной волны приходится на бальмеровский континуум, который при этом оказывается непрозрачным, как и лаймановский.

Fox&Wood [7] занимались расчётом излучения в линиях бальмеровской серии водорода. Они решали задачу о высвечивании в рамках однотемпературного приближения, используемая модель атома водорода состояла из десяти дискретных уровней и континуума. Также они учли возможное влияние металлов на охлаждение газа, введя модель металла с параметрами, соответствующими железу. Они получили, что линии бальмеровской серии могут быть непрозрачными за фронтом.

Fadeev&Gillet [8] решали задачу о высвечивании чисто водородного газа с учётом различия электронной и атомно-ионной температур для условий в атмосферах от цефеид до мирид. Модель атома водорода включала в себя от двух до пяти уровней. Они получили, что излучение в линиях не является пренебрежимо малым по сравнению с континуумом. Также для условий в атмосферах типа RR Lyr получили прозрачный бальмеровский континуум.

Белова с соавторами [9] решали задачу о высвечивании двухтемпературной плазмы, состоящей из водорода, гелия и металлов. Модель атома водорода включала в себя количество уровней, определяемого по критерию Инглиса–Теллера.

Модель высвечивания ударной волны оказалась также полезной в связи с проблемой вспышек на звёздах типа UV Кита. Характерной особенностью оптических спектров вспышек являются повышенная интенсивность эмиссионных линий по сравнению со спокойным состоянием и сильный эмиссионный континуум в коротковолновой области. Во время одних из первых спектральных наблюдений прототипа вспыхивающих карликов UV Cet звезда показывала спектр карлика класс M с эмиссионными линиями водорода и ионизованного кальция. На снимке-исключении были видны усиленные линии водорода, $\lambda\lambda$ 4026 и 4471 нейтрального гелия

и λ 4684 HeII, а также непрерывное излучение, которое замывало абсорбционные линии и полосы, особенно в синей области. Они сделали вывод, что повышенная яркость звезды главным образом связана с непрерывным спектром, а не с линиями. Подобное поведение спектра наблюдалось и в последующих наблюдениях.

Источником излучения в континууме может служить как прозрачный, так и оптически плотный газ. Это следует из того факта, что с одной стороны наблюдается бальмеровский скачок в эмиссии (прозрачный газ), а с другой — часть непрерывного спектра хорошо аппроксимируется планковской кривой (оптически плотный газ). Одновременность появления чернотельного излучения, спектральных линий и бальмеровского скачка свидетельствует о пространственной неоднородности излучающей области. Действительно, слои, дающие планковский спектр, находятся в состоянии, близком к термодинамическому равновесию, в то время как появление в спектре эмиссионной компоненты означает отсутствие равновесия. Таким образом, во вспышке одновременно проявляют себя как равновесные, так и неравновесные области газа.

Впервые гипотезу чернотельного излучения высказали Gordon&Kron [10] в связи с необходимостью объяснить голубой континуум и не слишком сильное поярчение в зеленой области. Согласно их оценкам изменение температуры всей звезды в целом способно объяснить только один эффект. Поэтому они предложили, что излучает небольшое горячее пятно на поверхности. Позднее Гринин и Соболев [11] в рамках гипотезы локального теплового равновесия рассчитали излучение в переходной области между фотосферой и хромосферой газа, прогретого в результате взрыва в верхних слоях атмосферы. Авторы показали, что в предельном случае мощных вспышек излучение близкое к чернотельному получается при нагреве глубоких слоев атмосферы звезды, а при меньшей мощности газ только частично непрозрачен за бальмеровским скачком. В этой работе была впервые проведена аналогия между механизмами образования звездных вспышек и белых вспышек на Солнце, а также продемонстрирована роль отрицательного иона водорода.

Kunkel [12] впервые предположил, что относительно слабый чернотельный спектр и более сильные линии водорода образуются в разных областях атмосферы звезды. Причём первый объясняется импульсным нагревом фотосферы, а вторые являются следствием рекомбинации расположенного над фотосферой ионизованного газа, прозрачного в непрерывном спектре оптического диапазона.

Наблюдения Mochnecki&Zirin [13] показали, что бальмеровский скачок меньше предсказываемого рекомбинационной теорией, поэтому чернотельная компонента может быть не малой величиной, но даже доминантой

излучения. Последующие наблюдения также не удавалось объяснить в рамках одного механизма: чернотельного излучения либо свечения оптически тонкой водородной плазмы.

Для объяснения природы излучения прозрачного в континууме газа и его свечения в линиях оказалась полезной гипотеза ударной волны, предложенная Vorp&Moffet [14]. Вполне возможно, что излучение в линиях объясняется не только ударной волной в хромосфере. Так, Соболев и Гринин [15] показали, что штарковские крылья линий атома водорода могут формироваться вместе с континуумом в верхних слоях фотосферы.

Идея объединения двух подходов — ионизации и нагрева надтепловыми частицами и свечения за фронтом ударной волны — пришла из теории солнечных вспышек. Костюк и Пикельнер [16] поставили и решили задачу об ионизации и нагреве хромосферы потоком движущихся из короны надтепловых электронов. По газу распространяется температурный скачок, связанный, главным образом, с теплопроводностью. Впереди температурного скачка распространяется ударная волна, нагревающая и сжимающая газ. Скорость движения уменьшается с глубиной. Результаты расчётов объясняли основные наблюдаемые особенности активной фазы солнечных вспышек. Кацова, Косовичев и Лившиц [17], [18] выполнили аналогичные расчёты для условий в хромосфере красной карликовой звезды. Основное внимание было уделено вспышкам средней силы, где поток энергии надтепловых частиц F_0 не превышал $3 \cdot 10^{11}$ эрг·см⁻²·с⁻¹. В [17] сформулирована гипотеза «хромосферной конденсации», согласно которой чернотельное излучение исходит из области размером около 10 км, находящейся на высоте примерно 15 000 км и образованная газом, изобарически сжатым в результате радиационного охлаждения за фронтом ударной волны до температуры около 9000 К и концентрации 10^{15} см⁻³. Позднее расчёты реакции атмосферы на поток надтепловых частиц были проделаны также Allred et al. [19] в однотемпературном приближении; рассматривалась нестационарная населённость шести уровней атома водорода, девяти уровней атома гелия, четырёх уровней иона Mg II и шести уровней Ca II.

Актуальность темы

Сохраняет актуальность создание алгоритма расчёта нестационарного охлаждения частично ионизованного газа за фронтом ударной волны, проходящей по тем слоям звёздных атмосфер, где невелико поглощение в непрерывном спектре, но существенно рассеяние в частотах линий. Актуальным также является учёт различия температур электронной и атомно-ионной компонент газа позади фронта. В настоящее время актуальны следующие аспекты алгоритма, касающиеся атома водорода.

Во-первых, необходимо учитывать полный набор дискретных уровней, допускаемых условиями задачи. Во-вторых, необходимо определить влияние возбуждённых уровней на состояние ионизации при ударной ионизации и тройной рекомбинации. В-третьих, важно выяснить степень влияния фотосферного излучения: фотоионизации непрерывным спектром и фотовозбуждения в частотах линий с одновременным учётом вынужденных процессов. В четвёртых, актуальной является задача вычисления спектра излучения ударной волны.

В случае долгопериодических переменных актуальна проблема положения областей, в которых формируются эмиссионные линии, относительно слоёв молекулярного и атомарного поглощения.

Цели работы

Главной целью работы является создание алгоритма расчёта спектра излучения водорода при нестационарном высвечивании частично ионизованного двухтемпературного газа, нагретого ударной волной, в условиях атмосфер холодных звёзд.

Создание алгоритма требует решения следующих задач.

- Исследование влияния ударной ионизации, тройной рекомбинации, ионизации и возбуждения фотосферным излучением и вынужденных на процесс охлаждения и излучение водорода.
- Определение количества уровней атома водорода, необходимого для расчёта.

Научная новизна

1. Впервые создан алгоритм для решения задачи о высвечивании газа за фронтом стационарной ударной волны, учитывающий все основные особенности нестационарного заселения и ионизации частично ионизованного водорода в условиях звёздных атмосфер. Алгоритм применён к хромосферам красных карликовых звёзд и атмосферам переменных звёзд типа Миры Кита.
2. Впервые показано, что в условиях красных карликовых звезд газ изначально прозрачный в оптическом диапазоне спектра остаётся прозрачным и после высвечивания за фронтом ударной волны.
3. Впервые показано, что основной вклад в излучение в линиях атома водорода за фронтом ударной волны приходится на бальмеровскую и пашеновскую серии. Излучение в бальмеровском и пашеновском континуумах превышает или сопоставимо с излучением в лаймановском континууме, причём соотношение между потоками излучения определяется параметрами атмосферы и скоростью фронта.

4. Получено новое подтверждение, что области атмосфер долгопериодических переменных, ответственные за появление эмиссионных линий, находятся под поглощающими слоями.

Научная и практическая значимость

Разработанный автором алгоритм расчёта нестационарного высвечивания газа позади фронта ударной волны, может быть применён для решения широкого круга задач о свечении надфотосферных слоёв Солнца и звёзд разных спектральных классов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Основной вклад в линейчатое излучение атома водорода за фронтом ударной волны в диапазоне скоростей $20 \div 90$ км/с в условиях атмосфер холодных звёзд приходится на бальмеровскую и пашеновскую серии. Излучение в бальмеровском и пашеновском континууме превышает или сопоставимо с излучением в лаймановском континууме. Соотношение между потоками определяется параметрами атмосферы и скоростью фронта.
2. Газ, изначально прозрачный в оптическом диапазоне спектра, после прохождения через фронт ударной волны и последующего высвечивания, остаётся прозрачным в этом диапазоне. Это не подтверждает известную гипотезу хромосферных конденсаций в моделях вспышек карликовых звёзд.
3. Газ, высвечивающийся за фронтом ударной волны в атмосферах переменных звёзд типа Миры Кита, не успевает охладиться до температуры ниже 3000 К за время, равное периоду изменения блеска. Таким образом, эмиссионные линии формируются под холодными слоями, что объясняет наблюдаемое наложение абсорбционных линий на эмиссионные профили.
4. Фотосферное излучение звёзд спектральных классов G–M влияет на бальмеровский декремент надфотосферного газа, прозрачного в линиях бальмеровской серии ($N_e < 10^{12}$ см⁻³). Бальмеровский декремент плотного газа ($N_e > 10^{13}$ см⁻³), не прозрачного в низших членах бальмеровской серии, практически не зависит от температуры излучения.
5. Для расчёта нестационарного излучения водорода необходимо учитывать не менее десяти его дискретных уровней. Теоретическая модель нестационарного высвечивания устойчива по отношению к числу учитываемых дискретных уровней, поэтому в любых условиях достаточно учитывать пятнадцать уровней, даже для

разреженного газа звёзд-гигантов, где реализуется большее количество уровней.

Достоверность

Результаты работы являются обоснованными и достоверными, они опубликованы в рецензируемых журналах и доложены на всероссийских и международных конференциях.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях:

1. О локализации области излучения эмиссионных линий в спектрах звёзд типа Миры Кита. **Белова О.М.** «Астрономия от ближнего космоса до космологических далей», ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 25–30 мая 2015 г.
2. On the localization of emission lines region in Mira stars. **Belova O.M.** «Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today», СПбГУ, Санкт–Петербург, Россия, 21–25 сентября 2015 г.
3. The effect of high excited hydrogen levels on ionization and recombination rate in the problem on shockwave in stellar atmospheres. **Belova O.M.** Международная астрономическая конференция «Физика звёзд от коллапса до коллапса», п. Нижний Архыз, Республика Карачаево–Черкесия, Россия, 3–7 октября 2016 г.
4. Влияние излучения фотосферы на надфотосферный газ. **Белова О.М.**, Бычков К.В. Всероссийская астрономическая конференция – 2017 «Астрономия: познание без границ», Ялта, Республика Крым, Россия, 17–22 сентября 2017 г.
5. Формирование эмиссионных линий водорода при высвечивании за фронтом ударной волны в условиях солнечной хромосферы. **Белова О.М.**, Бычков К.В. Тринадцатая ежегодная конференция Физика плазмы в солнечной системе, Москва, Россия, 12–16 февраля 2018 г.
6. К вопросу о локализации источников непрерывного спектра и эмиссионных линий водорода во время вспышек красных карликовых звёзд. **Бычков К.В.**, Белова О.М. «Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звездах», пгт. Научный, Республика Крым, Россия, 3–7 июня 2018 г.
7. О возможном вкладе ударной волны в спектр излучения вспышки красной карликовой звезды. **Белова О.М.**, Бычков К.В. «Звезды,

Основные публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, индексируемых в Web of Science.

1. Белова О.М., Бычков К.В., Рудницкий Г.М. Время охлаждения газа, нагретого ударной волной, в условиях атмосфер долгопериодических переменных звёзд типа Миры Кита // *Астрономический журнал*. - 2014. - Т. 91, № 12. - С. 1036. Импакт-фактор: 1.235.
2. Белова О.М., Бычков К.В. Устойчивость нестационарного охлаждения чисто водородного газа относительно числа учитываемых дискретных уровней // *Астрофизика*. - 2018. - Т. 61, №. 1. - С. 119. Импакт-фактор: 0.643.
3. Белова О.М., Бычков К.В. Влияние излучения фотосферы на вышележащие слои атмосферы звезды // *Астрофизика*. - 2018. - Т. 61, №. 2. - С. 255. Импакт-фактор: 0.643.
4. Белова О.М., Бычков К.В. Особенности высвечивания ударной волны в атмосферах красных карликовых звезд // *Астрофизика*. - 2019. Т. 62, №. 2. - С. 267. Импакт-фактор: 0.643.
5. Белова О.М., Бычков К.В. О вкладе тройной рекомбинации на высоковозбуждённые состояния в полную скорость рекомбинации в условиях звёздных атмосфер и межзвёздной среды // *Астрофизика*. - 2017. - Т. 60, №. 1. - С. 127. Импакт-фактор: 0.643.
6. Белова О.М., Бычков К.В. Ионизация из возбуждённых состояний как причина нестационарной населённости уровней водорода за фронтом ударной волны // *Астрофизика*. - 2017. - Т. 60, №. 2. - С. 219. Импакт-фактор: 0.643.
7. Belova O. M., Bychkov K. V. Cooling and energy loss of partially ionized hydrogen gas behind a shock wave // *Research in Astronomy and Astrophysics*. - 2018. - Vol. 18, no. 8. - P. 102-1-102-6. Импакт-фактор: 1.227.

Личный вклад

Соискатель принимал равное участие на всех этапах разработки алгоритма расчёта высвечивания частично ионизованного газа за фронтом ударной волны. Автором диссертации была предложена и решена задача об исследовании устойчивости охлаждения частично ионизованного водорода относительно числа учитываемых дискретных уровней. В остальных работах соискателем самостоятельно написаны все программы на языке

FORTTRAN, а также проведены соответствующие вычисления. Обсуждение результатов и подготовка к публикации проводилась совместно с соавторами.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 112 страниц, включая 31 рисунка и 14 таблиц. Список литературы содержит 102 наименования.

Во **введении** представлена основная информация по рассматриваемой теме, обсуждаются актуальность, цели и задачи работы, новизна и значимость результатов. Также сформулированы положения, выносимые на защиту, приведён список публикаций с основными результатами и личный вклад соискателя, написано краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена описанию алгоритма расчёта высвечивания. Указаны диапазоны скоростей фронта ударной волны и параметры хромосфер красных карликов и атмосфер долгопериодических переменных, которые используются в качестве начальных. Описаны основные уравнения задачи, учитываемые процессы и метод решения.

Во **второй главе** рассматривается вопрос о влиянии возбуждённых уровней на охлаждение и излучение водорода за фронтом ударной волны. В первом параграфе изучается устойчивость процесса высвечивания относительно числа уровней атома водорода. Во втором параграфе оценивается роль тройной рекомбинации на возбуждённые состояния. Она оказывается существенной даже для состояний низкого возбуждения. В третьем параграфе исследуется вопрос о роли ударной ионизации из возбуждённых состояний, которая оказывается причиной нестационарной населённости уровней атома водорода. В четвёртом параграфе сравниваются скорости ионизации и возбуждения под действием фотосферного излучения со скоростями ударных процессов, вынужденной фоторекомбинации со спонтанной. На основании модельных расчётов делается вывод о влиянии фотосферного излучения на бальмеровский декремент в случае, когда газ прозрачен в частотах линий бальмеровской серии. В пятом параграфе сравниваются процессы охлаждения газа и потеря энергии на излучение. Получено, что в случае нестационарных процессов охлаждение газа происходит даже в ситуации ослабления излучения за счёт перехода тепловой энергии во внутреннюю вследствие ионизации электронным ударом.

В **третьей главе** рассматривается приложение алгоритма расчёта к реальным условиям в звёздных атмосферах. Первая часть главы посвящена вспыхивающим звёздам типа UV Кита. Приведены оптические глубины по фотоионизации в пороговых частотах бальмеровской и пашеновской сериях и по тормозному поглощению, которые показывают, что высвечивающийся газ прозрачен в непрерывном спектре. Оценён вклад

линейчатого и непрерывного излучения в различных сериях в спектр ударной волны. Получено, что, во-первых, в линейчатый спектр основной вклад вносят бальмеровские и пашеновские линии. Во-вторых, суммарный вклад бальмеровского и пашеновского континуума не меньше, чем лаймановского. Во второй части третьей главы уделено внимание расчёту времени полного высвечивания газа позади фронта ударной волны. На основании сравнения периодов изменения блеска долгопериодических переменных и времени охлаждения сделан вывод о формировании эмиссионных линий под абсорбционными слоями.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Газ, высвечивающийся за фронтом ударной волны, прозрачен в континууме оптического диапазона спектра.
2. Основной вклад в излучение в линиях дают бальмеровская и пашеновская серии водорода. Вклад излучения в линиях сопоставим с излучением при рекомбинации на возбуждённые состояния. Излучение в бальмеровском и пашеновском континууме превышает или сопоставимо излучение в лаймановском континууме. Соотношение между линиями и континуумом определяется главным образом начальной плотностью и скоростью натекания. При заданной плотности вклад линий уменьшается с увеличением скорости, а при заданной скорости он падает с увеличением плотности. В обоих случаях причиной является более сильная ионизация газа за фронтом ударной волны.
3. Сравнение вычисленного времени полного охлаждения газа за фронтом ударной волны с периодами долгопериодических переменных звёзд типа Миры Кита показывает, что газ не успевает полностью охладиться в случае очень низкой начальной температуры $T_0 \lesssim 3000$ К. Отсюда следует, что эмиссионные линии образуются под слоями, ответственными за молекулярное и атомное поглощение.
4. Фотосферное излучение звёзд спектральных классов G–M влияет на бальмеровский декремент надфотосферного газа, прозрачного в линиях бальмеровской серии. Бальмеровский декремент плотного газа, не прозрачного в низших членах бальмеровской серии, практически не зависит от температуры излучения.
5. Минимальное количество уровней атома водорода, необходимое при расчётах высвечивания за фронтом ударной волны равно 10, иначе имеет место фиктивная недооценка ударной ионизации из возбуждённых состояний. Процесс высвечивания устойчив относительно числа учитываемых дискретных уровней. Достаточное число уровней равно 15, даже в случае реализации большего их количества.

Список литературы

1. *Пикельнер С.Б.* Спектрофотометрическое исследование механизма возбуждения волокнистых туманностей. // *Изв. КРАО*. — 1954. — Т. 12. — С. 93–117.
2. *Горбачук В.Г.* О причинах появления ярких линий водорода в спектрах долгопериодических переменных. // *Астрономический журнал*. — 1961. — Т. 38. — С. 256–266.
3. *Whitney C. A., Skalafuris A. J.* The structure of a shock front in atomic hydrogen. I. The effects of precursor radiation in the Lyman continuum. // *Astrophys. J.* — 1963. — Vol. 142. — Pp. 351–368.
4. *Skalafuris A. J.* The structure of a shock front in atomic hydrogen. II. The region of internal relaxation // *Astrophys. J.* — 1965. — Vol. 138. — Pp. 200–215.
5. *Yakubov I. T.* Effect of radiation on the state of the gas during passage of a shock wave in hydrogen // *Optics and Spectroscopy*. — 1965. — Vol. 19. — P. 12.
6. *Narita S.* The radiative energy loss from the shock front. // *Progress of Theoretical Physics*. — 1973. — Vol. 49. — Pp. 1911–1931.
7. *Fox M.W., Wood P.R.* Shock waves in Mira variables. II - Theoretical models. // *Astrophys. J.* — 1985. — Vol. 297. — Pp. 455–475.
8. *Fadeev Yu.A., Gillet D.* The structure of radiative shock waves. II. The multilevel hydrogen atom. // *Aston. Astrophys.* — 2000. — Vol. 354. — Pp. 349–364.
9. *Белова О.М., Бычков К.В. и др.* Роль металлов в охлаждении газа за фронтом ударной волны в атмосферах холодных звёзд. // *Астрон. журнал*. — 2014. — Т. 91. — С. 745–761.
10. *Gordon K.C., Kron G.E.* Flare of a dMe star, BD+20o2465, observed photoelectrically // *PASP*. — 1949. — Vol. 61. — Pp. 210–214.
11. *Гринин В.Г., Соболев В.В.* К теории вспыхивающих звёзд // *Астрофизика*. — 1977. — Vol. 13. — Pp. 587–603.
12. *Kunkel W.E.* An Optical Study of Stellar Flares: Ph.D. thesis / THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN. — 1967. — Pp. 503–518.
13. *Mochnecki S. W., Zirin H.* Multichannel spectrophotometry of stellar flares // *Astrophys. J.* — 1980. — Vol. 239. — Pp. L27–L31.

14. *Bopp B.W., Moffet T.J.* High time resolution studies of UV Ceti // *Astrophys. J.* — 1973. — Vol. 185. — Pp. 239–252.
15. *Соболев В. В., Гринин В. П.* Штарк-эффект в звездных вспышках // *Астрофизика.* — 1995. — Vol. 38, no. 1. — Pp. 33–44.
16. *Костюк И.Д., Пикельнер С.Б.* Газодинамика вспышечной области, прогреваемой потоком ускоренных электронов. // *Астрон. журнал.* — 1974. — Т. 51. — С. 1002–1016.
17. *Кацова М.М., Косовичев А.Г., Лившиц М.М.* Происхождение непрерывного оптического излучения вспышек на красных карликовых звездах. // *Астрофизика.* — 1981. — Vol. 17. — P. 285.
18. *Katsova M.M., Boiko A.Ya., Livshits M.A.* The gas-dynamic model of impulsive stellar flares // *Aston. Astrophys.* — 1997. — Vol. 321. — Pp. 549–556.
19. *Allred J.C., Kowalski A.F., Carlsson M.* A Unified Computational Model for Solar and Stellar Flares // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 809. — P. 104 (14).

