

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга

*На правах рукописи*



Морченко Егор Сергеевич

Теоретическое исследование природы непрерывного и линейчатого  
излучения в импульсной фазе вспышек красных карликовых звезд

01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия

23 АВГ 2017

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



008709746

Москва — 2017

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

**Научный руководитель:**

*Бычков Константин Вениаминович*, доктор физико-математических наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, отдел звёздной астрофизики, ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

- *Холтыгин Александр Фёдорович*, доктор физико-математических наук, Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет, кафедра астрономии, профессор.
- *Щекинов Юрий Андреевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, отдел теоретической астрофизики, главный научный сотрудник.
- *Татарникова Алина Александровна*, кандидат физико-математических наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, отдел радиоастрономии, старший научный сотрудник.

Защита диссертации состоится 5 октября 2017 г. в 14:00 на заседании Диссертационного Совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Университетский проспект, д. 13, конференц-зал.

E-mail: morchenko@physics.msu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (г. Москва, Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте: <https://istina.msu.ru/dissertations/60620946/>.

Автореферат разослан 15 августа 2017 года.

Ученый секретарь Диссертационного Совета,

доктор физико-математических наук



С.О. Алексеев

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

Физическая природа непрерывного и линейчатого излучения вспышек красных карликовых звёзд продолжает оставаться предметом исследований как теоретического, так и наблюдательного характера [1]. Представленные в научной литературе физические модели, интерпретирующие оптический континуум в импульсной фазе звёздных вспышек (прежде всего, [2, 3, 4]) противоречат друг другу [5]. Анализ этих моделей и астрофизических следствий из них способствует устранению *части* противоречий. Такое исследование помогает изучению супервспышек на звёздах солнечного типа (Machuga et al. [6]), а также белых вспышек на Солнце [7, 8, 2].

## Цель и задачи работы

Целью диссертации является теоретическое исследование физической природы непрерывного и линейчатого излучения, наблюдаемого в импульсной фазе вспышек красных карликовых звёзд, в рамках различных моделей вспышек.

• Гринин и Соболев [2] “перенесли” [2] источник непрерывного оптического излучения в импульсной фазе вспышек звёзд типа UV Cet в “переходную область между хромосферой и фотосферой” [2]. В рамках модели однородного плоского слоя заданной толщины  $L$  авторы показали, что излучение плотного водородного газа с суммарной концентрацией протонов и атомов  $N_{\text{H}} \sim 10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и температурой  $T \sim 8000 - 20000 \text{ К}$  [2, 9] хорошо объясняет небольшую величину бальмеровского скачка характерную для звёздных вспышек (например, Kowalski et al. [10]), а также планковское излучение (голубой континуум), доминирующее в спектрах вспышек вблизи максимума блеска (Moshnaski и Zirip [11]). В расчётах Гринин и Соболев [2] исходят из предположения о термодинамическом равновесии газа в пределах слоя (см. формулу (9) в статье [2]).

Нагрев околофотосферных слоёв осуществляется пучками *высокоэнергичных* ( $\approx 10 \text{ МэВ}$ ) протонов [12, 9] или/и ( $\approx 100 \text{ кэВ}$ ) электронов [13]. Начальные потоки энергии (“на верхней границе области вспышки” [12]) в протонном и электронном пучках  $F_0 \approx 10^{11} - 10^{12} \text{ эрг/см}^2\text{с}$  и  $F_0 \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ эрг/см}^2\text{с}$ , соответственно.

• Кацова, Косовичев и Ливниц [3] рассмотрели процессы, развивающиеся в результате нагрева верхней хромосферы красного карлика мощным пучком ускоренных электронов. В результате решения системы газодинамических уравнений в част-

ных производных с учётом теплопроводности и ускорения силы тяжести  $g$  авторы [3] установили, что “от области образовавшегося скачка давления вверх и вниз распространяются два возмущения” [3]. При этом “распространение возмущения” [3] по направлению к фотосфере (“вниз” [3]) “в последующие моменты времени они сводятся к решению типа температурной волны II рода [14]. Она характеризуется движением скачка температуры (тепловой волны) с дозвуковой скоростью, перед фронтом которого образуется [нестационарная] ударная волна” [3].

Авторы статьи [3] полагают, что область толщиной  $\Delta z \approx 10$  км с  $N_{II} \approx 2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> и  $T \approx 9000$  К, находящаяся между скачком температуры и фронтом нестационарной ударной волны (далее — хромосферная конденсация), является источником квазипланковского излучения в районе длины волны 4500 Å (см. рис. 4 в [3]). Однако, источник оптического континуума вспышки в модели [3] располагается на высоте  $\approx 1500$  км над уровнем невозмущённой фотосферы красного карлика [3], т.е. *существенно выше*, чем в модели [2].

Для расчёта интенсивности излучения хромосферной конденсации в непрерывном спектре и определения её показателей цвета Кацова и др. [3] используют неподвижный *термодинамически равновесный* однородный плоский слой в модели Гринина и Соболева [2] (см. формулу (7) и с. 296 в работе [3]).

- Авторы статей [2] и [3] *a priori* считают, что мензеловские множители газа в пределах слоя [2] равны единице. Кроме того, Кацова и др. [3] полагают, что слой толщиной  $L \approx 10$  км с  $N_{II} \approx 10^{15}$  см<sup>-3</sup> и  $T \approx 9000$  К в модели [2] непрозрачен справа от бальмеровского скачка.

Для проверки этих утверждений в диссертации решается задача о расчёте спектра излучения неподвижного слоя при отказе от локального термодинамического равновесия в широком диапазоне параметров плазмы возмущённой атмосферы красного карлика: от газа прозрачного в непрерывном спектре до газа, интенсивность излучения которого в оптическом диапазоне приближается к функции Планка.

- В 1980 г. Drake и Ulrich [15] вычислили мензеловские множители для неподвижного однородного плоского слоя чисто водородной плазмы в диапазоне электронных концентраций  $10^8 - 10^{15}$  см<sup>-3</sup> при температурах 5000–40000 К; входная оптическая глубина в линии  $L_\alpha$  составляет  $10^4 - 10^6$ . Авторы: а) учли точную структуру атома; б) использовали симметричный модельный профиль спектральной линии с доплеровским ядром и хольцмарковскими крыльями для нахождения средней по слою

вероятности выхода квапта; в) рассчитали относительные интенсивности линий в приближении газа *прозрачного* в непрерывном спектре.

Для решения первой задачи диссертации автор считает необходимым развить работу [15] в *двух* пунктах. Светимость вспышки в оптическом диапазоне больше, чем светимость невозмущённой атмосферы всей остальной звезды (Гринин и Соболев [2], с. 599), поэтому в расчётах требуется учесть влияние *собственного* излучения слоя (тормозного и рекомбинационного) на населённости атомных уровней. Также нужно принять во внимание, что в случае высших членов спектральных серий штарковский механизм уширения преобладает над доплеровским.

• Нестационарная ударная волна [3] (“составная часть” температурной волны II рода [14]) распространяется в *частично ионизованной* хромосфере красного карлика (см. сс. 290–291 в работе Кацовой и др. [3]) “вниз” [3] со скоростью до  $\sim 100$  км/с (с. 294 статьи [3]). Диапазон скоростей течения [3] является *дозвуковым* для электронной компоненты плазмы, но *сверхзвуковым* для атомно-ионной компоненты [16, 17, 18]. Следовательно, непосредственно за фронтом ударной волны [3], в *действительности*, имеет место ситуация, когда *атомно-ионная температура* газа  $T_{ai}$  существенно превосходит его электронную температуру  $T_e$ , т.е. верно, что

$$T_{ai} \gg T_e. \quad (1)$$

По этой причине в расчётах вспышечный слой сначала полагаем *двухтемпературным* ( $T_{ai} > T_e$ ).

• Важным методом диагностики плазмы звёздных вспышек служит расчёт относительных интенсивностей оптических эмиссионных линий атома водорода (бальмеровский декремент) [19]. Решение этой задачи требует корректного “отделения” профиля линии от непрерывного спектра (Eason et al. [20], с. 1167), так как во время импульсной фазы вспышек видны лишь *ядра* эмиссионных линий и небольшая часть крыльев (см. Kowalski et al. [10], с. 15).

В работах Бруевич и др. [21], Katsova et al. [22], основанных на результатах газодинамической модели [3] (параметры однородного плоского слоя), расчёт бальмеровского декремента в неподвижной среде проводился в приближении газа *прозрачного* в непрерывном спектре (формула (8) в [21] и аналогичная формула (13) в [22]). По мнению автора диссертации, такой подход не применим даже в начале фазы медленного (квазиэкспоненциального) затухания звёздных вспышек, так как и на этом временном интервале доминирует излучение в непрерывном спектре [10].

Второй задачей диссертации является создание метода расчёта *полной* интенсивности излучения в линиях бальмеровской серии атома водорода с учётом *частичной непрозрачности* вспышечного слоя в оптическом континууме.

• В статье [23] Nakagawa et al. предложили т.н. кинематическую модель *солнечных* вспышек — модель *стационарной* ударной волны с высвечиванием, распространяющейся в хромосфере по направлению к фотосфере ( $g \neq 0$ ). В расчётах авторы работы [23] используют оптически тонкую функцию охлаждения заведомо неприменимую в условиях *частично ионизованной* хромосферы Солнца.

По мнению автора диссертации, при изучении вторичных процессов в звёздных вспышках подход [23] представляет существенный интерес, поскольку позволяет детально исследовать условия достижения высоких концентраций (в пределе — околофотосферных) за фронтом стационарной ударной волны в результате *радиационного охлаждения* нагретого газа.

Третьей задачей диссертации является *развитие* модели [23] в части:

а) вывода замкнутой системы уравнений, описывающей эволюцию параметров плазмы позади фронта в двухтемпературном приближении [16, 17, 18] при  $g = 0$  с учётом влияния поля излучения *околофотосферных* слоёв, нагретых высокоэнергичными частицами (Гринин и др. [9, 13]);

б) изучения возможности получения околофотосферных концентраций за фронтом стационарной ударной волны посредством высвечивания с учётом *результатов*, полученных при решении первой задачи диссертации.

### Научная новизна

1. Впервые вычислен непрерывный спектр излучения двухтемпературного ( $T_{\text{ст}} > T_c$ ) неподвижного однородного плоского слоя чисто водородной плазмы с учётом самопоглощения в континууме и в линиях для условий вспышек на красных карликах в широком диапазоне оптической глубины в непрерывном спектре: от прозрачного газа до полностью непрозрачного.

2. Впервые получена формула для расчёта *полной* интенсивности излучения в линиях бальмеровской серии атома водорода с учётом *частичной* непрозрачности вспышечного слоя в оптическом континууме.

3. Впервые показано, что неподвижный однородный плоский слой чисто водородной плазмы с параметрами, соответствующими хромосферной конденсации в газодинамической модели звёздных вспышек (Кацова и др. [3]), прозрачен в оптическом

континууме.

4. Впервые показана необходимость учёта фотоионизации из возбуждённых состояний атомов водорода, находящиеся позади фронта стационарной ударной волны с высвечиванием, распространяющейся в хромосфере красного карлика, дилатированным планковским полем излучения околофотосферных слоёв, нагретых надтепловыми частицами.

### **Теоретическая и практическая значимость**

1. В рамках модели однородного плоского слоя фиксированной толщины с параметрами типичными для возмущённых атмосфер красных карликовых звёзд исследовано изменение формы непрерывного спектра по мере приближения к функции Планка.

2. Получена замкнутая система уравнений для расчёта профиля стационарной ударной волны с высвечиванием, распространяющейся в хромосфере красного карлика, с учётом влияния дилатированного планковского поля излучения околофотосферных слоёв, нагретых надтепловыми частицами.

3. Разработан метод расчёта скорости фотоионизации из возбуждённых состояний в приближении Крамерса для любых значений главного квантового числа при заданной температуре планковского поля излучения.

4. Установлено, что излучение в максимуме блеска звёздных вспышек создаёт не один, а несколько слоёв.

5. Разработанный метод расчёта теоретического бальмеровского декремента в импульсной фазе вспышек красных карликовых звёзд в модели однородного плоского слоя с учётом влияния непрерывного спектра может быть использован для уточнения физических параметров плазмы вспышек.

6. Утверждение о прозрачности в оптическом континууме неподвижного однородного плоского слоя чисто водородной плазмы с параметрами, соответствующими хромосферной конденсации в газодинамической модели (Кацова и др. [3]), — существенный аргумент в пользу теории формирования голубого континуума звёздных вспышек вблизи фотосферы.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Показано, что предложенный автором метод решения системы уравнений стационарности для населённостей атомных уровней позволяет вычислить спектр излучения двухтемпературного ( $T_{ni} > T_e$ ) неподвижного однородного плоского слоя

чисто водородной плазмы в широком диапазоне оптической глубины в континууме: от газа прозрачного в непрерывном спектре до полностью непрозрачного.

2. Исследовано преобразование непрерывного спектра слоя по мере увеличения степени поглощения в континууме. Установлено, что сначала термализуется красная часть спектра, а затем — синяя. Сделан вывод о том, что излучение в максимуме блеска звёздных вспышек [10] создают не один, а несколько слоёв.

3. Разработан метод учёта влияния непрерывного спектра на бальмеровский дефремент в модели однородного плоского слоя.

4. Показано, что неподвижный однородный плоский слой чисто водородной плазмы с параметрами, соответствующими хромосферной конденсации в газодинамической модели звёздных вспышек [3], прозрачен в оптическом континууме.

5. Показана необходимость учёта фотоионизации возбуждённых уровней атомов водорода, находящихся позади фронта стационарной ударной волны с высвечиванием в условиях хромосфер звёзд типа UV Cet, длинноволновым планковским полем излучения нагретых околофотосферных слоёв.

### Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации отражены в четырёх статьях, опубликованных в рецензируемых журналах:

1. К.В. Бычков, Е.С. Морченко. Влияние возбуждённых уровней на скорость фотоионизации околозвёздного газа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон., 66, №3, 89 (2011).
2. О.М. Белова, К.В. Бычков, Е.С. Морченко, Б.А. Низамов. Роль металлов в охлаждении газа за фронтом ударной волны в атмосферах холодных звёзд // Астрон. журн., 91, 745 (2014).
3. E.Morchenko, K.Bychkov, M.Livshits. Continuum and line emission of flares on red dwarf stars // Astrophys. Space Sci., 357, Issue 2, article id. 119 (2015). DOI: 10.1007/s10509-015-2347-y.
4. E.S. Morchenko. Origin of the Blue Continuum Radiation in the Flare Spectra of dMe Stars // Astrophysics, 59, 475 (2016). DOI: 10.1007/s10511-016-9450-9.

Статьи (1) и (2) опубликованы в журналах, входящих в базу RSCI; работы (3) и (4) — в западных рецензируемых журналах, индексируемых Scopus и Web of Science.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

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

*Основные результаты, полученные в диссертации докладывались на:*

- семинаре отдела звёздной астрофизики ГАИШ МГУ (2010 г.);
- V Пулковской молодёжной астрономической конференции (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 9—11 июня 2014);
- Десятой ежегодной конференции “Физика плазмы в Солнечной системе” (Москва, ИКИ РАН, 16—20 февраля 2015; устный доклад в секции “Теория космической плазмы”);
- международной конференции “Механизмы излучения космических объектов: классика и современность” (Санкт-Петербург, СПбГУ, 21—25 сентября 2015) в ознаменование 100-летия со дня рождения академика В.В. Соболева.

### **Личный вклад автора**

В работах (1) и (3) соискателем независимо проведены все вычисления. Кроме того, в статье (3) соискателем написан раздел “Photon escape probability”. В работе (2) соискатель принимал участие в выводе системы уравнений для расчёта профиля стационарной ударной волны с высвечиванием в частично ионизованной плазме холодных звёзд наравне с другими соавторами. Статья (4) написана соискателем единолично.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из Введения, трёх Глав, Заключение и Литературы. Основной текст иллюстрируют 3 рисунка и 6 таблиц, библиография содержит 90 наименований. Общий объём работы составляет 103 машинописные страницы.

## Содержание работы

Во *Введении* обосновывается актуальность темы диссертации; описываются и анализируются теоретические модели, интерпретирующие непрерывное и линейчатое излучение в импульсной фазе звёздных вспышек; формулируются цель и задачи диссертации; оцениваются научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; приводятся положения, выносимые на защиту; акцентируется внимание на необходимость учёта неравенства электронной и атомно-ионной температур ( $T_{ei} > T_e$ ) за фронтом нестационарной ударной волны в газодинамической модели звёздных вспышек (Кацова и др. [3]).

В *Главе 1* рассчитываются непрерывный и линейчатый спектры излучения двухтемпературного ( $T_{ei} > T_e$ ) неподвижного однородного плоского слоя чисто водородной плазмы с заданными  $N_H$  и  $\mathcal{L}$  в широком диапазоне оптической глубины в континууме — от прозрачного газа до полностью непрозрачного. Неравенство атомно-ионной и электронной температур обусловлено тем, что рассматриваемый слой газа получает энергию на фронте *стационарной* ударной волны с высвечиванием, распространяющейся в хромосфере красного карлика по направлению к фотосфере.

В *разделе 1.1* детально описана постановка задачи. Состояние ионизации газа перед фронтом ударной волны найдено путём численного решения системы уравнений Саха при  $T_0 = 3000$  К (температура фотосферы красного карлика) и  $N_0 = 10^{14}$  см<sup>-3</sup> (фоновая концентрация ионов и атомов) с учётом вклада металлов. Параметры газа непосредственно за разрывом для атомно-ионной компоненты плазмы получены с использованием адиабаты Ралкина-Гюгонно (с учётом вмороженности магнитного поля), а для электронной — с применением адиабаты Пуассона. Введены диапазоны изменения величин  $N_H$ ,  $T_{ei}$ ,  $T_e$  и  $\mathcal{L}$  однородного плоского слоя.

*Раздел 1.2* содержит систему уравнений статистического равновесия, учитывающую самопоглощение излучения в континууме и в линиях. Приведены формулы для расчёта: скорости фотоионизации собственным излучением слоя, коэффициента спонтанной фоторекомбинации, скоростей ударных процессов, коэффициента тройной рекомбинации. Изложен метод приближённого учёта рассеяния ионизирующего излучения и способ преобразования неоднородной системы алгебраических уравнений к однородной.

В *разделе 1.3* описано вычисление вероятностей спонтанных переходов и коэф-

коэффициентов Эйнштейна для индуцированного излучения/поглощения.

В разделе 1.4 даны формулы для расчёта интенсивности излучения однородного плоского слоя в непрерывном спектре. Показано, что функция источника  $S_\nu$  пропорциональна функции Планка  $B_\nu(T_e)$ . Приведено выражение для нахождения коэффициента вынужденной фоторекомбинации.

Раздел 1.5 содержит краткое описание приближения Бибермана-Холстейна, используемого для вычисления средней по слою вероятности выхода кванта за пределы однородной плоскопараллельной среды —  $\theta_{n'k}$  ( $k$  и  $n'$  — главные квантовые числа перехода  $k \rightarrow n'$ ,  $k > n'$ ). Обоснована возможность применения модельного симметричного профиля спектральной линии с доплеровским ядром и хольцмарковскими крыльями в случае резонансного и части субординантных переходов. Получена асимптотическая формула (предел большой оптической глубины в центре линии) для величины  $\theta_{12}$ :

$$\theta_{12} \approx \left( \frac{B_{21} \mathcal{E}_0}{\Delta \omega_{21}^D} \right)^{3/5} \frac{1}{(\tau_{12}^D)^{3/5}}. \quad (2)$$

Здесь  $B_{21} \mathcal{E}_0$  и  $\Delta \omega_{21}^D$  — штарковская и доплеровская полуширины, соответственно;  $\tau_{12}^D$  — оптическая глубина в центре доплеровского ядра спектральной линии в точке  $\mathcal{L}/2$ . Формулы для вычисления  $\theta_{n'k}$  при произвольных значениях  $n'$  и  $k$  даны в подразделе 1.5.2. Показана необходимость учёта неравенства  $T_{ai}$  и  $T_e$  возмущённой хромосферной плазмы при анализе формы ядра линии  $H_\alpha$  в импульсной фазе вспышки звезды dM5.6e [17].

В разделе 1.6 дан вывод формулы для нахождения полной интенсивности излучения в линиях бальмеровской серии атома водорода с учётом частичной непрозрачности вспышечного слоя в оптическом континууме.

Алгоритм решения системы уравнений стационарности приведён в разделе 1.7.

Раздел 1.8 содержит изложение результатов расчётов. Установлено, что в принятом диапазоне физических параметров слоя мензеловские множители газа слабо отличаются от единицы. На рис. 1.2 (рис. 1 настоящего автореферата) показано, как изменяется спектр излучения слоя фиксированной толщины  $\mathcal{L}$  с заданными значениями  $T_{ai}$  и  $T_e$  с ростом концентрации  $N_{\text{H}}$  по мере приближения к функции Планка. Видно, что с увеличением степени поглощения в континууме сначала термализуется красная часть спектра, а затем — синяя.

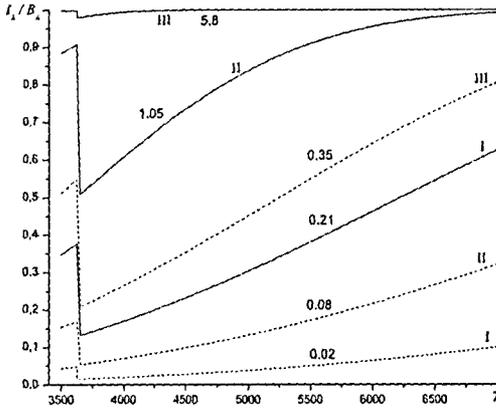


Рис. 1: непрерывный спектр однородного плоского слоя чисто водородной плазмы нормированный на функцию Планка. Пунктирные линии соответствуют  $T_e = 0.8$  эВ сплошные —  $T_e = 1.0$  эВ. Цифрами I, II и III отмечены кривые, полученные для следующих величин  $N_H$ :  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , соответственно. Над каждой кривой приведена оптическая глубина в континууме на длине волны  $\lambda = 4170 \text{ \AA}$ .

Астрофизическое обсуждение результатов расчётов производится в *разделе 1.9*. Аргументировано, что излучение в максимуме блеска звёздных вспышек создают не один [3], а *несколько* слоёв.

В *Главе 2* показано, что при  $\tau_{12}^D \sim 10^7$ ;  $0.8 \text{ эВ} \leq T_e \leq 1.5 \text{ эВ}$  интенсивности излучения в непрерывном спектре двух- ( $T_{ai} > T_e$ ) [24] и однотемпературного ( $T_{ai} = T_e = T$ ) [2] однородных плоских слоёв близки. Производится анализ астрофизических следствий газодинамической модели звёздных вспышек [3]. Установлено, что неподвижный однородный плоский слой чисто водородной плазмы с параметрами, соответствующими хромосферной конденсации [3], *прозрачен* в оптическом континууме. С целью проверки данного утверждения вычислена оптическая глубина в непрерывном спектре, соответствующая длине волны  $4500 \text{ \AA}$ , для *термодинамически равновесного* однородного плоского слоя. Показано, что слой газа с  $N_H = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 9000 \text{ К}$  генерирует квазипланковское излучение в районе длины волны  $4500 \text{ \AA}$  лишь при  $L \sim 215 \text{ км}$  и выше. Отмечается, что физические параметры хромосферной конденсации [3] близки к параметрам обра-

щающего слоя звезды спектрального класса A0. С использованием справочника Аллена [25] и таблиц Воды [26] найдена оптическая глубина плазмы обрамляющего слоя в непрерывном спектре на длине волны  $5000 \text{ \AA} - \tau_{5000}$ . Установлено, что величина  $\tau_{5000}$  близка к результатам расчётов  $\tau_{4170}$  и  $\tau_{4500}$  в случае чисто водородной плазмы. Утверждение о прозрачности однородного плоского слоя с параметрами [3] обсуждается в контексте статей Грининга и др. [13, 27] и работ Kowalski et al. [4, 28].

Третья глава диссертации посвящена развитию кинематической модели Nakagawa et al. [23] в применении к хромосферам звёзд типа UV Cet (случай чисто водородной плазмы).

В разделе 3.1 показано, что суммарная концентрация протонов и атомов позади фронта стационарной ударной волны с высвечиванием является однозначной функцией тепловой энергии газа (в расчёте на один атом/протон), отнесённой к теплоёмкости при постоянном объёме  $c_v = 3/2$ .

Система уравнений для *нестационарных населённостей* уровней атома водорода позади вязкого скачка содержится в разделе 3.2.

В разделе 3.3 приведены формулы для расчёта потерь энергии за счёт рекомбинационного излучения.

В разделе 3.4 получено дифференциальное уравнение для изменения тепловой энергии газа по мере высвечивания как функции времени, прошедшего с момента пересечения поверхности разрыва данным слоем газа.

Аналогичное уравнение для электронной температуры  $T_e$  записано в разделе 3.5.

В разделе 3.6 дано изложение методов учётов влияния диплотированного планковского поля излучения околофотосферных слоёв, нагретых надтепловыми частицами [9, 13] на эволюцию параметров газа позади фронта. Приведён алгоритм вычисления скорости фотоионизации из возбуждённых состояний в приближении Крамерса для любых значений главного квантового числа при заданной температуре планковского поля излучения. Показана необходимость учёта фотоионизации из возбуждённых состояний атомов, находящихся позади фронта стационарной ударной волны с высвечиванием в условиях хромосфер звёзд типа UV Cet, диплотированным планковским полем излучения нагретых околофотосферных слоёв.

Раздел 3.7 содержит детальное описание приведения полученной системы уравнений к безразмерной форме удобной для будущих численных расчётов.

В разделе 3.8 обсуждается возможность достижения околофотосферных концентраций  $N_H \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  в результате высвечивания за фронтом ударной волны: а) при выполнении условия вмороженности магнитного поля в течение всего времени нестационарного радиационного охлаждения газа; б) в случае, когда сжатие газа и изменение напряжённости магнитного поля не коррелируют друг с другом. Показано, что: а) в первом случае при распространении ударной волны в *верхних* и *средних* слоях хромосферы красного карлика достижение околофотосферных концентраций не представляется возможным (рост давления магнитного поля э фронтом ударной волны останавливает сжатие газа); б) во втором случае перенаплотности газа на два порядка приводит к тому, что плазма оттекает от вязкого скачка на *небольшое* расстояние. Показано, что получение околофотосферных концентраций в малой области, отстоящей от поверхности разрыва на расстоянии порядка нескольких сотен метров, не согласуется с данными спектральных наблюдений.

В Заключении суммированы и обобщены наиболее важные астрофизические результаты, содержащиеся в диссертации.

## Список литературы

- [1] Геринберг Р.Е. Активность солнечного типа звёзд главной последовательности — 3-е изд., доп. // Симферополь: Антикава (2015).
- [2] Гринин В.П., Соболев В.В. К теории вспыхивающих звёзд // Астрофизика. **13** 587 (1977).
- [3] Кацова М.М., Косовичев А.Г., Ливниц М.А. Происхождение непрерывного оптического излучения вспышек на красных карликовых звёздах // Астрофизика **17**, 285 (1981).
- [4] Kowalski, A.F., Hawley, S.L., Carlsson, M., Allred, J.C., Uitenbrock, H., Osten, R.A., Holman, G. New Insights into White-Light Flare Emission from Radiativ Hydrodynamic Modeling of a Chromospheric Condensation // Sol. Phys. **290**, 348 (2015).

- [5] Morchenko, E.S. Origin of the Blue Continuum Radiation in the Flare Spectra of dMe Stars // *Astrophysics*. **59**, 475 (2016).
- [6] Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., Notsu, Y., Nagao, T., Kusaba, S., Honda, S., Nogami, D., Shibata, K. Superflares on solar-type stars // *Nature*. **485**, 478 (2012).
- [7] Ding, M.D. The Origin of Solar White-Light Flares // In: Heinzel, P., Dorotovič, I., Rutten, R.J. (eds.). *The Physics of Chromospheric Plasmas*, ASP Conf. Ser. **368**, 417 (2007).
- [8] Heinzel, P., Kleint, L. Hydrogen Balmer Continuum in Solar Flares Detected by the Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) // *Astrophys. J. Let.* **794**, Issue 2, article id. L23 (2014).
- [9] Гринин В.П., Соболев В.В. О нагреве газа при звёздных вспышках. I. Нагрев протонами // *Астрофизика*. **31**, 527 (1989).
- [10] Kowalski, A.F., Hawley, S.L., Wisniewski, J.P., Osten, R.A., Hilton, E.J., Holtzman, J.A., Schmidt, S.J., Davenport, J.R.A. Time-resolved properties and global trends in dMe flares from simultaneous photometry and spectra // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **207**, Issue 1, article id. 15 (2013).
- [11] Mochnacki, S.W., Zirin, H. Multichannel spectrophotometry of stellar flares // *Astrophys. J.* **239**, L27 (1980).
- [12] Гринин В.П., Соболев В.В. О начальной фазе вспышек звёзд типа UV Кита // *Астрофизика*. **28**, 355 (1988).
- [13] Гринин В.П., Лоскутов В.М., Соболев В.В. О нагреве газа при звёздных вспышках. Нагрев электронами // *Астрон. журн.* **70**, 350 (1993).
- [14] Волосевич П.П., Курдюмов С.П., Бусуринна Л.Н., Крус В.П. Решение одномерной плоской задачи о движении поршня в идеальном теплопроводном газе // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* **3**, 159 (1963).
- [15] Drake, S.A., Ulrich, R.K. The emission-line spectrum from a slab of hydrogen at moderate to high densities // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **42**, 351 (1980).
- [16] Пикельнер С.Б. Спектрофотометрическое исследование механизма возбуждения волокнистых туманностей // *Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.* **12**, 93 (1954).

- [17] Коровяковская А.А. О природе излучения вспышек звёзд типа UV Ceti // *Астрофизика*. **8**, 247 (1972).
- [18] Fadeyev, Yu.A., Gillet, D. The Structure of Radiative Shock Waves. I. The method of global iterations // *Astron. Astrophys.* **333**, 687 (1998).
- [19] Герпберг Р.Е. Эмиссионный бальмеровский декремент и электронная плотность во вспышках звёзд типа UV Кита // *Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.* **51**, 11 (1974).
- [20] Eason, E.L.E., Giampapa, M.S., Radick, R.R., Worden, S.P., Hege, E.K. Spectroscopic and photometric observations of a five-magnitude flare event on U Ceti // *Astron. J.* **104**, 1161 (1992).
- [21] Бруевич Е.А., Кацова М.М., Лившиц М.А. Кинетика водородного атома в хромосферах красных карликов // *Астрон. журн.* **67**, 115 (1990).
- [22] Katsova, M.M., Livshits, M.A., Butler, C.J., Doyle, J.G. A gas-dynamic model for a flare on YZ CMi: interpretation of high-temporal-resolution spectroscopic data / *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **250**, 402 (1991).
- [23] Nakagawa, Y., Wu, S.T., Han, S.M. A Kinematic Model of a Solar Flare // *Solar Phys.* **30**, 111 (1973).
- [24] Morchenko, E., Bychkov, K., Livshits, M. *Astrophys. Sp. Sci.*, **357**, article id. 116 (2015). arXiv:1504.02749.
- [25] Аллен К.У. *Астрофизические величины*. — перераб. и доп. изд. // М.: Мир (1977).
- [26] Bode, G. *Kontinuierliche Absorbtion von Sternatmosphären*. Kiel, Sternwart (1965).
- [27] Соболев В.В., Гринин В.П. Штарк-эффект в звёздных вспышках // *Астрофизика*. **38**, 33 (1995).
- [28] Kowalski, A.F. White-Light Continuum in Stellar Flares // In: Kosovichev, A.G., Hawley, S.L., and Heinzel, P. (eds). *Solar and Stellar Flares and their Effects on Planets Proceedings IAU Symposium No. 320*, 2015. 259 (2016).

Подписано в печать 10.08.2017 г.  
Формат А5  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Тираж 100 экз.  
Типография ООО “ПринтСайдАп”  
115093, г. Москва,  
ул. Большая Серпуховская, д.38 к.8  
Тел. 8-495-587-71-31  
[www.printside.ru](http://www.printside.ru)