

На правах рукописи



Дмитриев Денис Витальевич

**Моделирование наблюдательных проявлений
магнитосферной аккреции у звезд типа UX Ori
поздних спектральных классов**

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ФГБУН ГАО РАН).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Гринин Владимир Павлович

Официальные оппоненты: **Ламзин Сергей Анатольевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
Государственный астрономический институт имени
П.К. Штернберга Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»
(ФГБОУ ВО ГАИШ МГУ),
ведущий научный сотрудник

Павлюченков Ярослав Николаевич,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Институт астрономии Российской
академии наук» (ФГБУН ИНАСАН),
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(ФГАОУ ВО УрФУ)

Защита состоится 25 апреля 2025 года в 11 часов 15 минут на заседании диссертационного совета 24.1.021.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГАО РАН (https://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2025/01/Dissertation_Dmitriev.pdf).

Автореферат разослан 25 марта 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.021.01,
к.ф.-м.н.



Осипова Александра Анатольевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. После формирования звезд малой ($< 1.5M_{\odot}$, спектральный класс M-F) и промежуточной ($< 8M_{\odot}$, спектральный класс A-B) массы во время их движения к главной последовательности у них наблюдается сильная фотометрическая и спектральная активность. Молодые звезды малой массы относятся к типу Т Тельца, промежуточной — к типу Ae/Be Хербига. Более массивные звезды не видны до их выхода на главную последовательность. Объектом исследования в настоящей диссертации является один из подтипов звезд Т Тельца или Ae/Be Хербига: звезды типа UX Ori, выделяемые по особенностям их фотометрической переменности [1; 2]. При этом основное внимание уделено звездам поздних спектральных классов, т.е., в основном, звездам типа Т Тельца.

Звезды типа Т Тельца были впервые выделены в отдельное семейство звезд в работе [3] как нерегулярно переменные, тусклые звезды поздних спектральных классов (F и позже) с эмиссионными линиями, похожими на линии в хромосфере Солнца, находящиеся в близости от туманностей. О молодости этих звезд впервые написал Амбарцумян, заметив их частую близость с группами OB звезд и назвав звезды типа Т Тельца маломассивными аналогами этих короткоживущих (молодых) звезд [4]. Впоследствии это предположение было подтверждено их положением на диаграмме Герцшпрунга-Рассела правее и выше главной последовательности в согласии с ранними теоретическими расчетами ранних фаз эволюции звезд [5], близостью их лучевых скоростей с лучевыми скоростями соседних темных туманностей [6], а также большим содержанием лития [7].

Принято разделять звезды типа Т Тельца (TTS: T Tauri stars) на классические (CTTS: classical TTS) и «weak-line» — звезды Т Тельца со слабыми эмиссионными линиями (WTTS), у которых эквивалентная ширина линии $H\alpha < 5\text{\AA}$ [8]. Различие между этими двумя подтипами объясняется аккрецией из протопланетного диска у CTTS и её отсутствием у WTTS [9]. Стоит отметить, однако, что разделение на эти два класса по линии $H\alpha$ не всегда дает надежные результаты: в работах [10; 11] отмечается тот факт, что у $\approx 30\%$ WTTS с признаками диска наблюдаются признаки аккреции, а именно характерного профиля линии $\text{HeI } 10830\text{\AA}$. Аккреционная активность CTTS является причиной многих их наблюдаемых особенностей. В настоящее время считается, что основным механизмом аккреции на эти звезды является магнитосферная аккреция.

Молодые звезды отличаются своей высокой фотометрической активностью. Отдельно принято выделять эруптивную переменность молодых звезд, которая связывается с резким ростом аккреции из протопланетного диска: вспышки звезд типа FU Ori и EX Lup. Остальная фотометрическая активность звезд типа Т Тельца считается обусловленной тремя механизмами [1]:

1. Холодные магнитные пятна на поверхности звезды
2. Горячие аккреционные пятна в местах падения газа на звезду
3. Затмения пылью в околозвездном окружении (протопланетном диске)

Переменность звезд типа UX Ori, являющиеся объектом исследования данной диссертации, обусловлена третьим из них [2; 12]. Такой механизм переменности делает эти звезды чрезвычайно интересными объектами для исследования, так как он напрямую связан с состоянием вещества в протопланетном диске и, как следствие, с аккреционной активностью звезды. При этом меньшая светимость звезд типа Т Тельца в сравнении со звездами Ae/Be Хербига позволяет пыли существовать в непосредственной близости от звезды и взаимодействовать с магнитосферой.

Целью данной работы является моделирование проявлений магнитосферной аккреции в спектрах и фотометрической переменности звезд типа UX Ori поздних спектральных классов, т.е., относящихся к звездам типа Т Тельца.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать эмиссионные спектры магнитосфер звезд типа Т Тельца согласно актуальным представлениям о них.
2. Исследовано влияние отклонений от ионизационного равновесия, вызванных движением газа в магнитосфере.
3. Изучены возможные проявления магнитосферной аккреции в характеристиках спектральной и фотометрической активности звезд типа UX Ori.

Научная новизна:

1. В описанной в настоящей диссертации модели магнитосферной аккреции впервые рассмотрено влияние на профили формирующихся в магнитосфере эмиссионных линий отклонений ионизации газа от равновесного состояния вследствие его движения
2. С помощью разработанной модели определены характеристики магнитосферы звезды RZ Psc во время вспышки её аккреционной активности в ноябре 2013 года.
3. Подробно изучены проявления горячих аккреционных пятен в фотометрической переменности звезд типа UX Ori поздних спектральных классов.
4. Разработана модель, способная объяснить быстрые изменения показателя цвета звезды типа UX Ori RY Lup.

Практическая значимость. В настоящей диссертации описывается модель магнитосферной аккреции, разработанная в согласии с принятыми в настоящее время подходами к моделированию магнитосфер молодых звезд, которую можно применять для моделирования наблюдаемых спектров звезд типа Т Тельца. В частности, с помощью описанной модели,

получены характеристики магнитосферы звезды RZ Psc во время вспышки её аккреционной активности.

Также впервые исследовано влияние адвективного переноса ионизационного состояния на формируемый в магнитосфере эмиссионный спектр. Показано, что отказ от учета этого эффекта может приводить к ошибкам в определении темпа аккреции на поздних стадиях аккреционной активности молодых звезд.

Из результатов работы также следует, что наличие на поверхности звезды горячего аккреционного пятна может оказывать значительное влияние на характеристики фотометрической переменности звезд типа UX Ori поздних спектральных классов. Разработанная модель быстрой переменности звезды RY Lup может быть также применена и к другим звездам типа Т Тельца с высоким темпом аккреции.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе уже существующих методов расчетов разработана модель эмиссионных спектров магнитосфер молодых звезд. С её помощью рассчитаны профили водородных линий и продемонстрировано влияние наклона магнитного диполя на переменность линии $H\alpha$.
2. Впервые исследовано влияние адвекции степени ионизации на параметры эмиссионных линий водорода, образующихся в магнитосфере звезды. Показано, что при низких темпах аккреции $\lesssim 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$ влияние этого процесса становится существенным.
3. С помощью разработанного пакета программ промоделирована линия $H\alpha$ в спектре звезды типа UX Ori RZ Psc во время вспышки её аккреционной активности. Определены темп аккреции и геометрические параметры магнитосферы. Получена оценка магнитного поля на поверхности звезды.
4. Исследовано влияние горячих аккреционных пятен, возникающих при магнитосферной аккреции, на показатели цвета во время минимумов блеска холодных звезд типа UX Ori. Показано, что наличие горячего пятна на поверхности звезды приводит к увеличению разброса показателя цвета звезды на диаграммах цвет-величина. Впервые дано объяснение быстрым изменениям показателей цвета звезды типа Т Тельца RY Lup, наблюдавшимся во время глубокого минимума блеска.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепринятых методов моделирования магнитосфер молодых звезд. Результаты расчетов согласуются с результатами, полученными другими авторами [13–15]. Достоверность определения модельных параметров из

наблюдательных данных достигается за счет расчета теоретических моделей для большого количества комбинаций параметров.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих астрономических конференциях:

1. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2017, Ялта, 17–22 сентября 2017
2. Конференция «Звезды, планеты и их магнитные поля», Санкт-Петербург, 17–21 сентября 2018
3. Международная конференция «The UX Ori type stars and related topics», Санкт-Петербург, 30 сентября – 4 октября 2019
4. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021, Москва, 23–28 августа 2021
5. Конференция «Нестационарные процессы в протопланетных дисках и их наблюдательные проявления», Научный, 11–16 сентября 2022

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 7 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 7 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

- A1. Дмитриев, Д. В. Образование эмиссионных линий водорода в магнитосферах молодых звезд / Д. В. Дмитриев, В. П. Гринин, Н. А. Катышева // Письма в Астрономический Журнал. — 2019. — Т. 45. — С. 422–434.
- A2. Дмитриев, Д. В. Модели магнитосферной аккреции на молодые звезды в отсутствие ионизационного равновесия / Д. В. Дмитриев, В. П. Гринин // Письма в Астрономический Журнал. — 2022. — Т. 48, № 1. — С. 34–42.
- A3. Magnetospheric Accretion at the Late Phases of the Pre-Main-Sequence Evolution: The Case of RZ Psc / D. V. Dmitriev [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2023. — Vol. 520, no. 3. — P. 3706–3711.
- A4. Дмитриев, Д. В. Показатели цвета звезд типа Т Тельца в моделях переменной околозвездной экстинкции / Д. В. Дмитриев, В. П. Гринин, О. Ю. Барсунова // Письма в Астрономический Журнал. — 2021. — Т. 47, № 1. — С. 22–30.
- A5. Дмитриев, Д. В. О природе быстрой переменности показателей цвета звезды типа UX Ori RY Lupi в глубоких минимумах блеска / Д. В. Дмитриев, В. П. Гринин // Письма в Астрономический Журнал. — 2023. — Т. 49. — С. 552–561.
- A6. Квазирезонансные состояния водородного газа / В. П. Гринин [и др.] // Астрономический Журнал. — 2020. — Т. 97. — С. 641–650.

- А7. Тамбовцева, Л. В. Моделирование эмиссионных линий водорода в спектре UX Ori в ярком состоянии и во время затмений / Л. В. Тамбовцева, В. П. Гринин, Д. В. Дмитриев // Астрономический Журнал. — 2020. — Т. 97. — С. 997–1013.

В работах [А1; А2] вклад автора заключается в разработке, реализации и тестировании модели магнитосфер молодых звезд. В работе [А3] автор рассчитывал модельные профили линии $H\alpha$ и проводил с их помощью интерпретацию наблюдаемого профиля. Работы [А4; А5] посвящены фотометрическим характеристикам звезд типа UX Ori во время затмений. В них вклад автора также заключается в разработке и реализации теоретических моделей и интерпретации с их помощью наблюдательных данных. В работах [А6; А7] с помощью автора его соавторами была использована разработанная им модель магнитосферы.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава носит вводный характер. В ней описываются основные характеристики магнитосфер звезд типа Т Тельца и их наблюдательные проявления. В разделе 1.1 описываются основные масштабы магнитосферы. В раздел 1.2 посвящен формированию и моделированию горячего аккреционного пятна, образующегося в местах падения газа на звезду. В разделе 1.3 кратко описываются процессы формирования эмиссионных линий в магнитосферах звезд типа Т Тельца. В заключительном разделе 1.4 упомянута перспективная одномерная модель магнитосферы.

Во второй главе подробно описывается разработанная диссертантом на основе уже существующих подходов модель магнитосферы звезд типа Т Тельца, позволяющая рассчитывать водородный спектр падающего на звезду газа. В разделе 2.1 описываются методы расчета плотности и температуры газа в магнитосфере. В разделе 2.2 приводятся уравнения стационарности, используемые для расчета населенностей атомных уровней. Раздел 2.3 посвящен нахождению поля излучения в магнитосфере. Интенсивности в спектральных линиях находятся в приближении Соболева [16; 17]. В разделе 2.4 приведены методики расчета профилей водородных линий, образованных в магнитосфере. Подраздел 2.4.1 посвящен учету вращения магнитосферы.

В Разделе 2.5 приводятся результаты расчетов демонстрационных моделей. На рис. 1 показаны профили различных линий водорода для

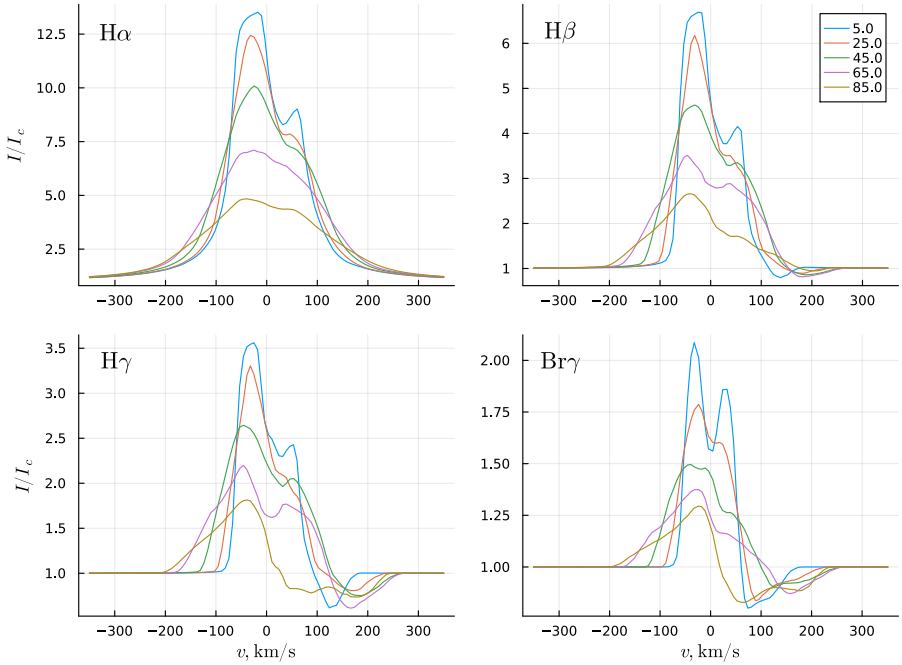


Рис. 1 — Профили четырех линии водорода ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $Br\gamma$) для модели с параметрами $\dot{M} = 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$, $T_{\text{max}} = 7000 \text{ K}$, $R_{\text{in}} = 2 R_{\star}$, $W = 1 R_{\star}$ в зависимости от угла i : наклона к лучу зрения оси вращения звезды, совпадающей с осью магнитного поля. Профили для различных значений этого угла показаны разными цветами и подписаны в легенде графиков.

темпа аккреции $\dot{M} = 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$, максимальной температуры в магнитосфере $T_{\text{max}} = 7000 \text{ K}$, внутреннего радиуса магнитосферы $R_{\text{in}} = 2 R_{\star}$, и ширины магнитосферы $W = 1 R_{\star}$. В качестве параметров звезды брались типичные для звезд типа Т Тельца $R_{\star} = 2 R_{\odot}$, $M_{\star} = 0.5 M_{\odot}$, $T_{\star} = 4000 \text{ K}$, $v_{\text{eq}} = 10 \text{ км/с}$. В **заключительном разделе** формулируются общие результаты главы. В **подразделе 2.5.1** обсуждается переменность профилей спектральных линий, вызванная несовпадением оси магнитного поля с осью вращения звезды (см. рис. 2).

Третья глава посвящена возможным отклонениям степени ионизации в магнитосфере от равновесного состояния в связи с быстрым движением газа. В **Разделе 3.1** выводятся общие уравнения баланса для населенностей атомных уровней. В **разделе 3.2** на примере линии $H\alpha$ подробно исследуется влияние отклонений от ионизационного равновесия на профили эмиссионных линий (Рис. 3). Показано, что оно становится существенно при низких темпах аккреции $\lesssim 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$. В **разделе 3.3**

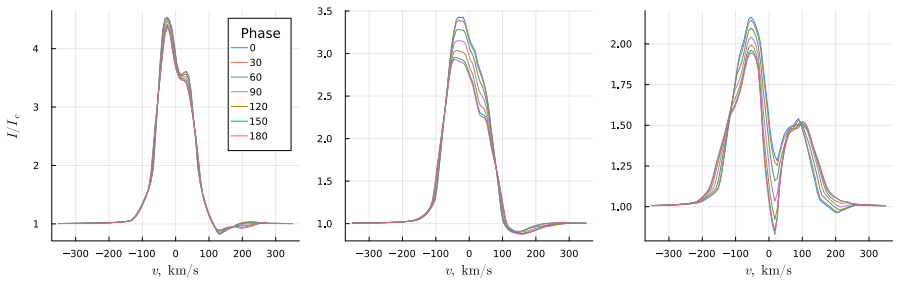


Рис. 2 — Изменение профиля линии $H\alpha$ при изменении фазового угла ψ , значения которого на графиках показаны разным цветом. Угол между осью магнитосферы и осью вращения звезды $\gamma = 5^\circ$. Угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения от левого графика к правому равен $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ$. $\dot{M} = 10^{-8} M_\odot/\text{год}$, $T_{\text{max}} = 7000 \text{ K}$, $R_{\text{in}} = 4 R_\star$, $W = 1 R_\star$

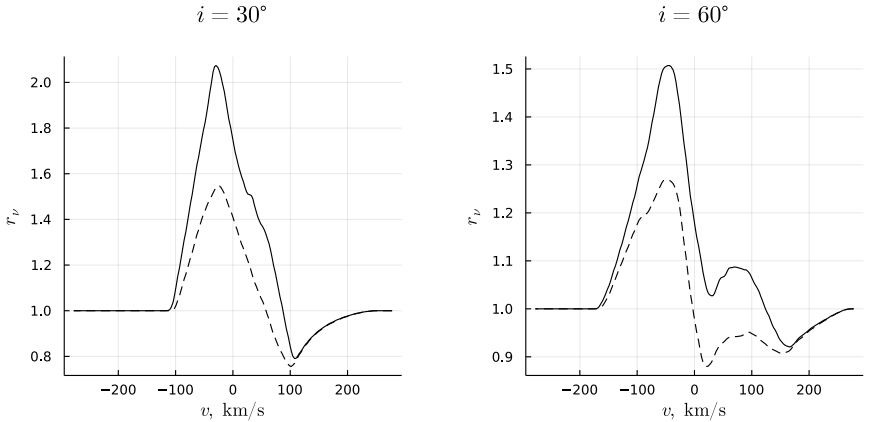


Рис. 3 — Модельные профили линии $H\alpha$, рассчитанные для магнитосферы с параметрами $\dot{M} = 10^{-9} M_\odot/\text{год}$, $T_{\text{max}} = 8000 \text{ K}$, $R_{\text{in}} = 2 R_\star$, $W = 1 R_\star$ при разных углах наклона i оси магнитосферы к лучу зрения. Профили, полученные в стационарном приближении, показаны сплошной линии, а профили, полученные без него — пунктиром.

демонстрируется, что отказ от учета этого эффекта может привести к существенному изменению темпа аккреции при его определении с помощью моделирования линии $H\alpha$. **Заключительный раздел** кратко описывает основные результаты главы.

В **четвертой главе** представлены результаты моделирования профиля линии $H\alpha$, наблюдавшегося в спектре звезды UX Ori RZ Psc во время вспышки её аккреционной активности в ноябре 2013 года. В **разделе 4.1**

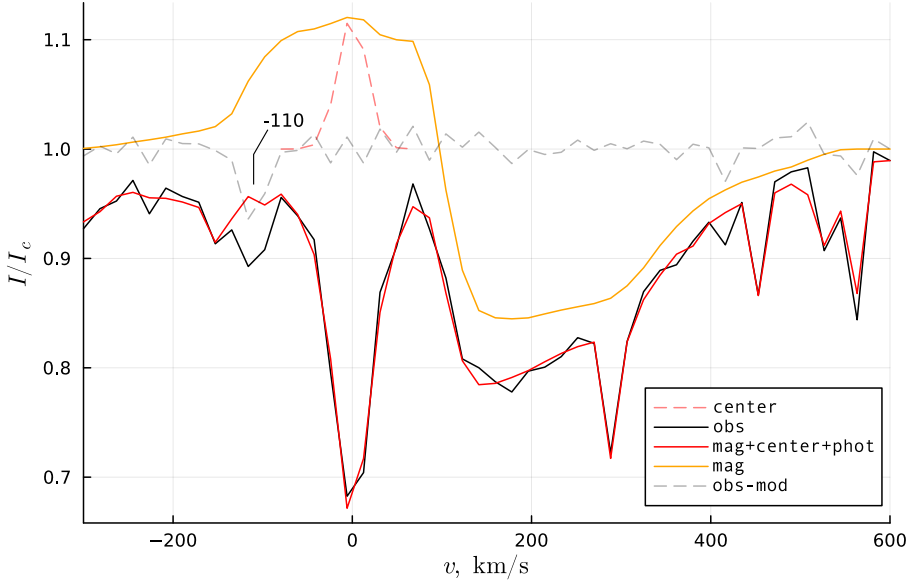


Рис. 4 — Сравнение одного из модельных профилей $H\alpha$ с наблюдаемым. Суммарный модельный профиль показан сплошной красной линией, наблюдаемый профиль — сплошной черной линией. Серым пунктиром показана разница между ними, подписано наибольшее отклонение модельного профиля от наблюдаемого на $v \approx -110$ км/с. Оранжевой сплошной линией показан магнитосферный профиль без учета фотосферного профиля звезды. Красным пунктиром показан центральный компонент. Параметры модели магнитосферы: $\dot{M} = 2.5 \times 10^{-10} M_{\odot}/\text{год}$, $T_{\text{max}} = 9000$ К, $R_{\text{in}} = 5 R_{\star}$, $W = 2 R_{\star}$, $i = 45^{\circ}$. Центральный компонент имеет параметры: высота $A = 0.12$ и ширина $\Delta v = 16$ км/с.

описывается наблюдавшийся спектр. **Раздел 4.2** кратко описывает модель, на основе которой рассчитывался спектр. Так как в работах других авторов темп аккреции оценивался как $5 \times 10^{-11} M_{\odot}/\text{год}$ [18], при расчетах использовалась модель с учетом отклонения от ионизационного равновесия.

В **разделе 4.3** формулируется методика получения параметров магнитосферы из наблюдений линии $H\alpha$ и модельных расчетов. Помимо магнитосферной составляющей в модельном профиле учитывались также фотосферный спектр звезды и узкий эмиссионный компонент, формирующийся в активных областях на поверхности звезды (см. Рис. 4). Помимо линии $H\alpha$ для ограничения возможных параметров магнитосферы использовались также профили линий ионизованного кальция и нейтрального

натрия. **Заключительный раздел** посвящен обсуждению и интерпретации полученных результатов. Получена оценка темпа аккреции в $\dot{M} \approx 7 \times 10^{-11} M_{\odot}/\text{год}$ ($\log \dot{M} = -10.1 \pm 0.3$). Это значение на порядок выше темпа в спокойном состоянии звезды $\dot{M} \leq 7 \times 10^{-12} M_{\odot}/\text{год}$ [19]. Из полученных модельных значений темпа аккреции и внутреннего радиуса магнитосферы сделана оценка магнитного поля звезды в 0.1 кГс.

Пятая глава посвящена влиянию аккреционного пятна на поверхности звезды на фотометрическую активность звезды. В **разделе 5.1** рассматривается поведение звезды типа UX Ori с горячим пятном на диаграмме цвет-величина во время затмений. **Подраздел 5.1.1** посвящен описанию модели затмения. В **подразделе 5.1.2** приводятся результаты моделирования. Показано, что для того, чтобы горячее пятно оказывало существенный вклад на треки затмений на диаграмме цвет-величина в пылевой экран должен быть существенно неоднороден на масштабе диска звезды (см. рис. 5). В таком случае может возникать ситуация, при которой

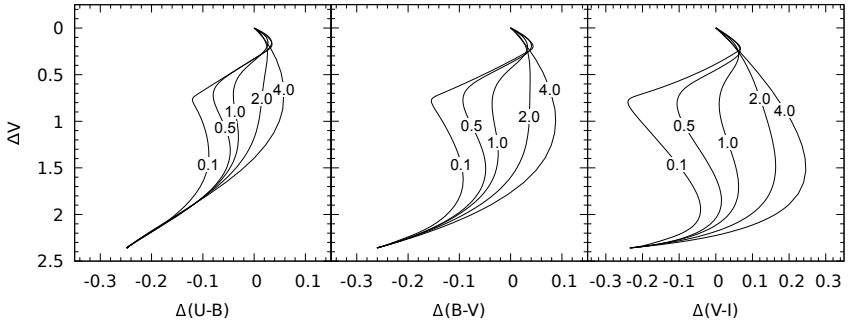


Рис. 5 — Диаграммы цвет-величина при параметрах модели $\dot{M} = \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$, $R_{\text{in}} = 2 R_{\star}$, $W = 1 R_{\star}$. Различные линии соответствуют разным значениям масштаба неоднородности распределения пыли в экране $h/R_{\star}$, подписанным на графиках. Угол наклона $i = 80^{\circ}$.

фотосфера звезды закрывается сильнее чем горячее пятно, что приводит к смещению цвета звезды в голубую сторону. Соответственно, наличие на звезде горячего пятна может объяснить большой разброс наблюдаемых показателей цвета у некоторых звезд типа UX Ori. В **подразделе 5.1.3** кратко подводятся итоги и описываются результаты раздела.

Раздел 5.2 посвящен моделированию быстрой переменности звезды типа UX Ori RY Lup, описанной в работе Гама и др. (1989) [20]. Она проявлялась, в основном, в резком (в течении получаса) изменении показателя цвета $(B - V)$ на несколько десятых звездных величины при практически

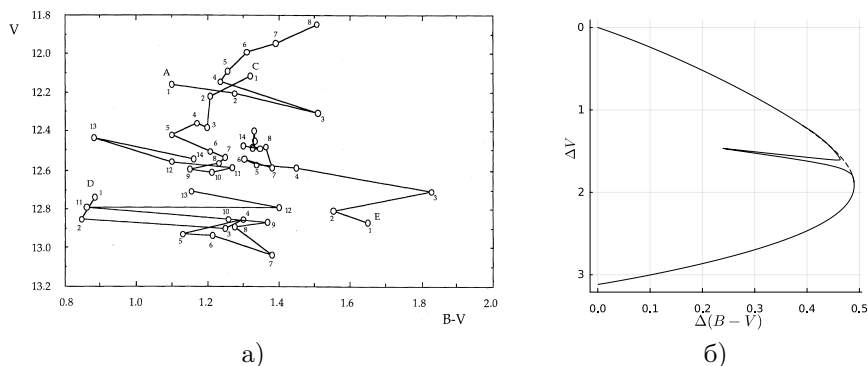


Рис. 6 — а) диаграмма цвет-величина, построенная по наблюдениям Лисо и др. (1987) [21], взятая из работы Гама и др. (1989) [20]. Наблюдения в течении одной ночи соединены линиями и подписаны буквами. Цифры на графике указывают порядок проведения наблюдений. Между последовательными наблюдениями проходило около 10-30 минут. б) демонстрационный расчет прохождения просветления в пылевом экране по горячему пятну на поверхности звезды во время затмения. Пунктиром показан модельный трек затмения в отсутствии просветления.

неизменном блеске. При этом часто после скачка наблюдался столь же резкий возврат к значению показателя цвета, близкому к изначальному (см. рис. 6). В подразделе 5.2.1 предлагается объяснение подобному поведению звезды. При наличии в экране небольшого сгустка или просветления в распределении пыли и присутствии на поверхности звезды горячего пятна подобную переменность можно объяснить прохождением по горячему пятну подобной структуры. Приводится качественная модель такого прохождения, основанная на модели затмения, описанной в предыдущем разделе. В подразделе 5.2.2 предлагается численная реализация более абстрактной модели прохождения, в которой существенно сокращено количество свободных параметров. Подраздел 5.2.3 описывает результаты моделирования наблюдавшихся скачков. В подразделе 5.2.4 подводятся итоги моделирования. Необходимые для воспроизведения наблюдений характеристики горячего пятна согласуются с типичными для звезд типа Т Тельца, а размеры структуры (сгустка или просветления) в экране — с оценками других авторов [22], полученными из обработки фотосферных спектров другой звезды UX Ori CQ Tau.

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

1. На основе уже устоявшихся методов разработана модель эмиссионных спектров магнитосфер молодых звезд. Она успешно воспроизводит наблюдаемые водородные спектры молодых звезд

- и позволяет исследовать на их основе процессы взаимодействия аккреционных дисков с магнитным полем звезды. В перспективе планируется добавление других элементов (атомов и ионов) для диагностики состояния плазмы в магнитосфере.
2. С помощью этой модели проведены расчеты профилей водородных линий для моделей аккреции с наклоненным магнитным диполем (случай звезд типа AA Tau).
 3. Впервые выполнены расчеты интенсивностей и профилей водородных линий с учетом эффектов нестационарности процесса рекомбинации при движении газа в магнитосфере звезды.
 4. Проведено моделирование профиля линии $\text{H}\alpha$, наблюдавшейся в спектре звезды типа UX Ori RZ Psc во время вспышки её аккреционной активности в 2013 году. Из полученного темпа аккреции и других параметров магнитосферы сделана оценка магнитного поля звезды (0.1 кГс).
 5. В рамках магнитосферной модели аккреции исследовано влияние горячих аккреционных пятен на показатели цвета во время минимумов блеска холодных звезд типа UX Ori. Впервые дано объяснение быстрым изменениям показателей цвета звезды типа T Тельца RY Lup, наблюдавшимся во время глубоких ослаблений блеска.

Диссертация выполнена при поддержке Министерства Науки и Образования РФ (грант № 075-15-2020-780). Автор выражает благодарность и признательность своему научному руководителю Гринину В. П. за научное руководство, помощь, поддержку и обсуждение результатов. Также автор благодарит соавторов его статей Тамбовцеву Л. В., Барсунову О. Ю., Ермолаеву Т.А., Катышеву Н. А. и Потравнова И. С. за совместную научную работу и обсуждение полученных результатов.

Список литературы

1. Catalogue of UBVRI Photometry of T Tauri Stars and Analysis of the Causes of Their Variability / W. Herbst [et al.] // The Astronomical Journal. — 1994. — Vol. 108. — P. 1906—1923.
2. The Investigations of ‘zodiacal Light’ of Isolated AE-Herbig Stars with Non-Periodic Algol-type Minima / V. P. Grinin [et al.] // Astrophysics and Space Science. — 1991. — Vol. 186, no. 2. — P. 283—298.
3. Joy, A. H. T Tauri Variable Stars. / A. H. Joy // The Astrophysical Journal. — 1945. — Vol. 102. — P. 168.
4. Амбарцумян, В. А. Эволюция звезд и астрофизика / В. А. Амбарцумян. — Ереван : Издательство Академии наук Армянской ССР, 1947. — 36 с.

5. Henyey, L. G. The Early Phases of Stellar Evolution / L. G. Henyey, R. Lelevier, R. D. Levée // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 1955. — Vol. 67. — P. 154.
6. Herbig, G. H. Radial Velocities and Spectral Types of T Tauri Stars / G. H. Herbig // The Astrophysical Journal. — 1977. — Vol. 214. — P. 747—758.
7. Magazzu, A. Lithium Abundances in Classical and Weak T Tauri Stars / A. Magazzu, R. Rebolo, I. V. Pavlenko // The Astrophysical Journal. — 1992. — Vol. 392. — P. 159—171.
8. Bertout, C. T Tauri Stars - Wild as Dust / C. Bertout // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 1989. — Vol. 27. — P. 351—395.
9. Петров, П. П. Звезды типа Т Тельца / П. П. Петров // Астрофизика. — 2003. — Т. 46. — С. 611—643.
10. A Census of the Low Accretors. I. The Catalog / T. Thanathibodee [et al.] // The Astronomical Journal. — 2022. — Vol. 163. — P. 74.
11. A Census of the Low Accretors. II. Accretion Properties / T. Thanathibodee [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2023. — Vol. 944. — P. 90.
12. Гринин, В. П. О природе голубого излучения наблюдаемого в глубоких минимумах неправильных переменных звезд / В. П. Гринин // Письма в Астрономический Журнал. — 1988. — Т. 14. — С. 65—69.
13. Hartmann, L. Magnetospheric Accretion Models for T Tauri Stars. 1: Balmer Line Profiles Without Rotation / L. Hartmann, R. Hewett, N. Calvet // The Astrophysical Journal. — 1994. — Vol. 426. — P. 669—687.
14. Muzerolle, J. Emission-Line Diagnostics of T Tauri Magnetospheric Accretion. II. Improved Model Tests and Insights into Accretion Physics / J. Muzerolle, N. Calvet, L. Hartmann // The Astrophysical Journal. — 2001. — Vol. 550. — P. 944—961.
15. Hydrogen Emission from Accretion and Outflow in T Tauri Stars / T. J. G. Wilson [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — Vol. 514, no. 2. — P. 2162—2180.
16. Грачёв, С. И. Анализ профилей линий в спектре квазара PHL 5200 / С. И. Грачёв, В. П. Гринин // Астрофизика. — 1975. — Т. 11. — С. 33—47.
17. Rybicki, G. B. A Generalization of the Sobolev Method for Flows with Nonlocal Radiative Coupling. / G. B. Rybicki, D. G. Hummer // The Astrophysical Journal. — 1978. — Vol. 219. — P. 654—675.
18. Potravnov, I. S. Flares of Accretion Activity of the 20 Myr Old UXOR RZ Psc / I. S. Potravnov, V. P. Grinin, N. A. Serebriakova // Astronomy and Astrophysics. — 2019. — Vol. 630. — A64.

19. Accretion and Outflow Activity on the Late Phases of Pre-Main-Sequence Evolution. The Case of RZ Piscium / I. S. Potravnov [et al.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2017. — Vol. 599. — A60.
20. Long- and Short-Term Variability of the T Tauri Star RY Lupi. / G. F. Gahm [et al.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 1989. — Vol. 211. — P. 115—130.
21. Liseau, R. The Strange "Spots" on the T Tauri Star RY Lupi. / R. Liseau, K. P. Lindroos, C. Fischerstrom // *Astronomy and Astrophysics*. — 1987. — Vol. 183. — P. 274—278.
22. Dodin, A. V. Inhomogeneous Dust Eclipses in Young Stars: The Case of CQ Tauri / A. V. Dodin, E. A. Suslina // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — Vol. 503. — P. 5704—5714.