

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Сусликов Михаил Викторович

**Исследование магнитных катаклизмических
переменных на поздних стадиях эволюции**

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Казань — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель: **Колбин Александр Иванович**,
кандидат физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе
Специальной астрофизической обсерватории
Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Погодин Михаил Александрович**,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, заведующий
лабораторией физики звезд Главной (Пулков-
ской) астрономической обсерватории Россий-
ской академии наук

Семена Андрей Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник отдела астро-
физики высоких энергий Института космиче-
ских исследований Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего образова-
ния «Санкт-Петербургский государственный
университет»

Защита состоится 30 сентября 2026 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.04.25 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на веб-сайте ФТИ www.ioffe.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н.

П. С. Штернин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Катаклизмические переменные (КП) представляют собой полуразделённые двойные системы, состоящие из аккрецирующего белого карлика (аккретора) и маломассивной звезды-донора, заполняющей свою полость Роша [1; 2]. Орбитальные периоды КП лежат в интервале от ~ 80 минут до нескольких часов. Считается, что КП образуются из относительно широких ($\sim 100 R_{\odot}$) пар звёзд главной последовательности. В процессе эволюции более массивный компонент доходит до стадии сверхгиганта и поглощает звезду-спутник, что приводит к формированию общей оболочки. После её сброса в виде планетарной туманности возникает разделённая двойная система, состоящая из белого карлика и звезды главной последовательности, — так называемая предкатаклизмическая переменная. Дальнейшая потеря углового момента, обусловленная магнитным торможением за счет звёздного ветра холодного компонента, приводит к сокращению большой полуоси орбиты и переходу системы в полуразделённую конфигурацию, наблюдаемую как КП.

При слабой замагниченности белого карлика ($B \lesssim 0.1$ МГс) вокруг него образуется аккреционный диск. Наблюдательные свойства таких систем существенно зависят от темпа аккреции. При высоком темпе массообмена ($\dot{M} \gtrsim 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$) аккреционные диски являются стабильными, а кривые блеска систем не демонстрируют значительных изменений яркости, за исключением эпизодических переходов в низкие состояния, когда перенос массы временно приостанавливается. Такие системы называют новоподобными. При низком темпе аккреции ($\dot{M} \lesssim 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$) в диске развивается тепловая неустойчивость, проявляющаяся в виде квазипериодических вспышек амплитудой $2 - 7^{\text{m}}$ и продолжительностью в несколько суток. Системы этого типа называют карликовыми новыми. Среди них выделяется подкласс SU UMa, объекты которого помимо упомянутых «нормальных» вспышек также демонстрируют так называемые сверхвспышки, отличающиеся большей продолжительностью (1 – 2 недели) и большей амплитудой (на $1 - 2^{\text{m}}$). Считается, что сверхвспышки возникают при увеличении размеров диска до резонансного радиуса $3 : 1$, при котором развивается приливная неустойчивость.

При сильной замагниченности белого карлика ($B \sim 10 - 100$ МГс) аккреция осуществляется путём переноса вещества вдоль линий магнитного поля без образования аккреционного диска [3]. Такие системы именуются полярами или звёздами типа AM Нег. Сильное магнитное поле приводит к синхронизации этих систем, то есть их орбитальный период оказывается равен периоду вращения белого карлика. При ударе падающего газа о поверхность аккретора образуются горячие ($T \sim 10 - 50$ кэВ) аккреционные

пятна, которые являются источниками рентгеновского тормозного излучения и поляризованного ($\sim 10\%$) циклотронного излучения, наблюдаемого в оптическом и инфракрасном диапазонах.

При средних значениях магнитного поля белого карлика ($B \sim 0.1 - 10$ МГс) существуют системы, называемые промежуточными полярными или звёздами типа DQ Her [4]. В этих объектах формируется аккреционный диск, внутренние области которого разрушаются магнитным полем белого карлика. Данные системы являются асинхронными: типичный период вращения белого карлика составляет $P_{\text{rot}} \sim 0.1 P_{\text{orb}}$. Промежуточные полярные являются одним из основных классов источников жёсткого рентгеновского излучения на небе [5]. Из-за наличия аккреционного диска часть промежуточных полярных обнаруживается среди карликовых новых и новоподобных систем [6; 7].

Ключевым фактором эволюции КП является потеря углового момента [8]. В молодых КП с длинными орбитальными периодами ($P_{\text{orb}} \gtrsim 3$ ч) это происходит главным образом за счёт магнитного торможения, обусловленного звёздным ветром. В интервале орбитальных периодов $P_{\text{orb}} \sim 2 - 3$ ч магнитное торможение оказывается неэффективным, и основным механизмом потери углового момента становится излучение гравитационных волн. Наблюдательным проявлением этого является пробел периодов, содержащий сравнительно малое число известных КП. Уменьшение орбитального периода продолжается до достижения минимального значения $P_{\text{min}} \sim 80$ мин, когда донор становится коричневым карликом. На этом этапе эволюция КП с субзвёздным компонентом идёт в обратном направлении, то есть сопровождается увеличением орбитального периода. Такие системы называют период-баунсерами (англ. period bouncers). Одной из главных проблем теории эволюции КП является недостаток наблюдаемых период-баунсеров по сравнению с теоретическими предсказаниями. Согласно расчётам, системы, прошедшие через минимум периода, должны составлять $\sim 40 - 70\%$ от общего числа КП [9]. Однако их наблюдаемая доля в настоящее время оценивается лишь в $\sim 10\%$ [10; 11].

Происхождение магнитных КП до сих пор остаётся предметом дискуссий. Ранее рассматривались гипотезы, включающие теорию реликтового поля (fossil field; [12]) и модель динамо на стадии общей оболочки [13]. Однако эти теории противоречат наблюдательным данным: молодые предкатаклизмические системы с горячими белыми карликами не демонстрируют признаков сильной замагниченности, тогда как магнитные белые карлики обнаруживаются среди более старых систем, известных как предполярные (pre-polars; [14]). Этот факт указывает на то, что магнитное поле возникает уже после стадии общей оболочки [15]. Согласно современной гипотезе, поле может генерироваться непосредственно на стадии КП благодаря динамо-механизму, возникающему в процессе кристаллизации ядра белого карлика при его достаточном охлаждении [16]. Взаимодействие

возникшего магнитного поля с донором может приводить к временно-му увеличению орбиты и переходу системы в разделённое состояние (т.е. в предполяр). Далее, вследствие потери углового момента система сжимается и вновь становится полуразделённой, переходя в стадию поляр. Однако недавние теоретические работы ставят под сомнение эффективность кристаллизационного динамо. В частности, энергии конвективной зоны кристаллизующегося белого карлика может быть недостаточно для генерации сильных магнитных полей, а время диффузии поля из ядра к поверхности может оказаться слишком большим [17; 18]. В качестве альтернативы рассматривается гипотеза, согласно которой сильные магнитные поля проявляются на поверхности белого карлика лишь спустя 2 – 3 млрд лет после его образования. При этом поле может иметь реликтовую природу и формироваться ещё на стадии главной последовательности [18].

Эволюционные пути магнитных и немагнитных КП имеют свои отличия. Ярким наблюдательным свидетельством этого является слабая выраженность пробела периодов у поляр [19–21]. Считается, что различие в распределениях должно быть связано с влиянием магнитного поля белого карлика на потерю углового момента системой. Принцип действия этого механизма пока остаётся спорным, однако существуют две противоположные гипотезы. Согласно первой, магнитное поле белого карлика увеличивает радиус магнитосферы системы, тем самым усиливая её торможение [22]. Во втором сценарии звёздный ветер донора аккрецирует на белый карлик вдоль линий магнитного поля, что уменьшает потерю углового момента системой [23]. Поскольку темп обмена массой в поляр ниже, чем в немагнитных системах, второй сценарий представляется более правдоподобным [24].

Для выяснения природы и эволюции магнитных полей белых карликов в КП важны измерения фундаментальных параметров компонентов на разных эволюционных стадиях и исследование топологии магнитных полей. В данной диссертационной работе рассматриваются магнитные системы с орбитальным периодом вблизи минимального $P_{\text{orb}} \approx 80$ мин. Эти системы отличаются низкими темпами аккреции, что упрощает оценку параметров компонентов и восстановление геометрии магнитного поля белых карликов. Кроме того, исследования короткопериодических систем необходимы для уточнения поздних стадий эволюции КП и, в частности, решения проблемы недостатка период-баунсеров. Согласно гипотезе [25], после прохождения системой минимума периода у белого карлика возникает сильное магнитное поле. Оно приводит к синхронизации вращения компонентов и передаче углового момента от вращения белого карлика к орбитальному движению. В результате происходит увеличение орбиты, и система переходит в разделённое состояние, в котором она может пребывать миллиарды лет и, таким образом, не проявляться как аккрецирующая КП.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью данной диссертационной работы является углубление понимания происхождения, структуры и роли магнитного поля в эволюции тесных двойных систем. Для достижения поставленной цели необходимо определить фундаментальные параметры компонентов, характеристики аккреции и магнитного поля на широкой выборке КП. Настоящая работа сфокусирована на исследовании короткопериодических систем, что обусловило постановку и решение следующих задач:

1. Получение и обработка фотометрических и спектроскопических фазово-разрешённых наблюдений магнитных КП V379 Vir, IL Leo и Gaia 19cwm на оптических телескопах САО РАН, а также извлечение архивных данных других обсерваторий.
2. Анализ временных рядов фотометрических наблюдений с целью определения орбитальных и вращательных периодов, выявления характерных типов переменности и состояний аккреции.
3. Определение фундаментальных параметров компонентов исследуемых систем: эффективных температур, радиусов и масс.
4. Исследование геометрической структуры аккреционных потоков по данным фазово-разрешённой спектроскопии.
5. Определение физических параметров аккреционных пятен на поверхности белых карликов на основе моделирования циклотронного излучения.
6. Анализ зеемановского расщепления фотосферных линий белых карликов для определения напряжённости и геометрии магнитного поля.

Научная новизна

1. На основе фотометрии магнитного период-баунсера V379 Vir выполнено моделирование спектрального распределения энергии, позволившее уточнить параметры компонентов системы и оценить темп аккреции. Показано, что наблюдаемый темп массопереноса соответствует полярам в низком состоянии и превышает ожидаемые значения для ветровой аккреции с коричневого карлика.
2. Для системы V379 Vir исследована орбитальная переменность оптических спектров, показавшая, что эмиссия $H\alpha$ формируется преимущественно в аккреционной струе вблизи точки Лагранжа L_1 , а не на облучённой поверхности донора. На основе анализа зеемановского расщепления водородных линий получена кривая изменения магнитного поля в течение орбитального периода. Показано, что структура магнитного поля белого карлика отличается от дипольного приближения.
3. Проведено комплексное исследование поляра IL Leo в низком состоянии. На основе моделирования спектрального распределения

энергии определены параметры белого карлика. По зеемановскому расщеплению водородных линий сделано уточнение среднего магнитного поля. Анализ динамического спектра и доплеровских томограмм показал, что эмиссия $H\alpha$, вероятно, формируется преимущественно в аккреционной струе. Моделирование циклотронных гармоник позволило определить параметры аккреционного пятна и оценить темп аккреции системы.

4. Исследован транзит Gaia 19cwm, впервые классифицированный как затменная карликовая новая типа WZ Sge. Обнаружен устойчивый период внезатменной переменности, интерпретируемый как период вращения магнитного белого карлика. Доплеровские томограммы продемонстрировали наличие аккреционного диска и горячего пятна. По данным анализа профиля затмения определены параметры компонентов системы, а рентгеновские свойства объекта позволили отнести его к промежуточным полярам с низкой светимостью.

Научная и практическая значимость

Работа расширяет представления о физических процессах в магнитных КП на поздних стадиях эволюции. Полученные результаты имеют значение для понимания механизмов магнитоконтролируемой аккреции в условиях низкого массопереноса, характерного для полярных в низком состоянии. Исследование систем V379 Vir, IL Leo и Gaia 19cwm позволило получить новые наблюдательные ограничения для моделей эволюции КП с магнитными белыми карликами. Определённые параметры звёздных компонентов и характеристики аккреции способствуют уточнению особенностей эволюции компактных двойных систем вблизи минимального орбитального периода. Важное значение имеют результаты исследования магнитного поля белых карликов. Анализ зеемановского расщепления и циклотронных гармоник позволил определить характеристики и геометрию магнитного поля, а также уточнить его влияние на структуру аккреционных потоков и наблюдаемые проявления магнитной аккреции. Полученные выводы могут быть использованы при интерпретации данных современных фотометрических и спектроскопических обзоров неба, а также в дальнейших исследованиях магнитных КП.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Поляр с коричневым карликом V379 Vir не проявляет переходов между состояниями с различным темпом аккреции. Белый карлик имеет массу $M_1 = 0.61 \pm 0.05 M_\odot$ и эффективную температуру $T_{\text{eff},1} = 10930 \pm 350 \text{ K}$, а донор — радиус $R_2 = 0.095 \pm 0.018 R_\odot$ и эффективную температуру $T_{\text{eff},2} = 1600 \pm 180 \text{ K}$. Темп аккреции составляет $\dot{M} \approx 3 \times 10^{-13} M_\odot/\text{год}$, что соответствует низкому

состоянию у полюсов и не согласуется со сценарием ветровой аккреции.

2. В системе V379 Vir основная доля эмиссионной линии H α формируется в аккреционной струе вблизи точки Лагранжа L₁. Магнитное поле белого карлика обладает сложной топологией, отличной от дипольной.
3. Кандидат в магнитные период-баунсеры IL Leo демонстрирует наличие переходов между состояниями с амплитудой изменения блеска $\sim 2 - 3^m$. Белый карлик характеризуется массой $M_1 = 0.74 \pm 0.05 M_\odot$, эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 12700 \pm 360 K$ и средним магнитным полем $B = 40.7 \pm 0.5$ МГс. В низком состоянии системы эмиссионная линия H α , вероятно, формируется в аккреционной струе. Относительная площадь аккреционного пятна составляет $f \approx 1.5 \times 10^{-3}$, наклонение оси вращения белого карлика — $i \approx 69^\circ$, а темп аккреции в низком состоянии равен $\dot{M} = (2.5 - 4.1) \times 10^{-13} M_\odot/\text{год}$.
4. Транзиент Gaia 19cwm принадлежит к затменным карликовым новым типа WZ Sge. При этом подтверждено наличие аккреционного диска и горячего пятна. Впервые определен орбитальный период $P_{\text{orb}} = 86.32048 \pm 0.00005$ мин и период вращения белого карлика $P_{\text{rot}} \approx 6.45$ мин. Масса белого карлика составляет $M_1 = 0.66 \pm 0.06 M_\odot$, масса донора — $M_2 = 0.073 \pm 0.015 M_\odot$, наклонение орбиты — $i = 83.8 \pm 1.1^\circ$. Система относится к редкой группе промежуточных полюсов с низкой рентгеновской светимостью.

Достоверность полученных результатов

Исследование основано на оригинальных фотометрических и спектроскопических наблюдениях магнитных КП, полученных на оптических телескопах САО РАН и других обсерваторий с использованием современных приборов. Для комплексного анализа также были привлечены архивные данные фотометрических обзоров неба, наземных и космических обсерваторий. Обработка наблюдательного материала проводилась в соответствии со стандартными методами редукции астрономических изображений с применением специализированных программных средств и пайплайнов. Анализ полученных данных выполнен с использованием современных программных библиотек и языков программирования. Определение параметров компонентов исследуемых систем проводилось на основе апробированных теоретических спектральных моделей. Реализованная в работе методика вычисления синтетических спектров циклотронного излучения основана на ранее опубликованных подходах. Полученные оценки параметров исследуемых систем согласуются с результатами авторов предшествующих работ в тех случаях, где это представлялось возможным.

Апробация работы

Основные и промежуточные результаты диссертационного исследования докладывались на следующих всероссийских конференциях:

1. Конференция «Магнетизм и активность Солнца и звезд — 2021» (31.08–03.09.2021, КрАО РАН). Устный доклад: «Исследование слабоаккрецирующего поляра с коричневым карликом V379 Vir» (Сусликов М. В., Колбин А. И.).
2. Конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения — 2022» (23–27.07.2022, САО РАН). Постерный доклад: «Исследование магнитной катаклизмической переменной V379 Vir» (Сусликов М. В., Колбин А. И.).
3. Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2022 (НЕА–2022)» (19–22.12.2022, ИКИ РАН). Постерный доклад: «Исследование магнитной катаклизмической переменной V379 Vir» (Сусликов М. В., Колбин А. И., Борисов Н. В., Буренков А. Н.).
4. Конференция «Физика звезд: теория и наблюдения» (26–30.06.23, ГАИШ МГУ). Устный доклад: «V379 Vir — слабоаккрецирующий поляр с коричневым карликом» (Сусликов М. В., Колбин А. И., Борисов Н. В., Буренков А. Н.).
5. Конференция «БАК–2024» (25–31.08.2024, САО РАН). Постерный доклад: «Картирование аккреционных пятен в поляре V379 Vir» (Сусликов М. В., Колбин А. И.).
6. Конференция «БАК–2024» (25–31.08.2024, САО РАН). Постерный доклад: «Gaia 19cwm — переменная типа WZ Sge с магнитным белым карликом?» (Колбин А. И., Фатхуллин Т. А., Винокуров А. С., Павленко Е. П., Сосновский А. А., Сусликов М. В., Кочкина В. Ю.).
7. Конференция «БАК–2024» (25–31.08.2024, САО РАН). Устный доклад: «Спектральное исследование поляра IL Leo в низком состоянии» (Сусликов М. В., Колбин А. И.).
8. Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2024 (НЕА–2024)» (23–26.12.2024, ИКИ РАН). Постерный доклад: «Поляр IL Leo с низким темпом аккреции» (Сусликов М. В., Колбин А. И.).
9. Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2024 (НЕА–2024)» (23–26.12.2024, ИКИ РАН). Постерный доклад: «Gaia 19cwm — затменная карликовая новая типа WZ Sge с магнитным белым карликом» (Колбин А. И., Фатхуллин Т. А., Павленко Е. П., Сусликов М. В., Кочкина В. Ю., Винокуров А. С., Сосновский А. А., Панарин С. С., Борисов Н. В.).

10. Конференция пользователей российских телескопов (14.04.2026, САО РАН). Устный доклад: «Исследование магнитных катаклизмических переменных на поздних этапах эволюции» (Сусликов М. В., Колбин А. И., Борисов Н. В.)

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы изложены в 6 публикациях, включая 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в Белый список Российского центра научной информации (1–3 уровни) и индексируемых в базе данных Web of Science, а также 2 статьи в сборниках трудов конференций. Для публикаций, в которых соискатель не является первым автором, личный вклад указан в скобках.

- A1. **Сусликов М. В.**, Колбин А. И., Борисов Н. В. / Об аккреции в поляре V379 Vir // Письма в Астрономический журнал. — 2025. — Т. 51, № 2. — С. 61–71.
- A2. **Сусликов М. В.**, Колбин А. И., Борисов Н. В. / Фазово-разрешённая спектроскопия поляра с коричневым карликом V379 Vir // Астрофизический бюллетень. — 2026. — Т. 81, № 1. — С. 46–55.
- A3. **Suslikov M. V.**, Kolbin A. I., Borisov N. V. / The Polar IL Leo in a Low Accretion State // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2026. — Vol. 26, No. 6. — P. 065017.
- A4. Колбин А. И., Фатхуллин Т. А., Павленко Е. П., **Сусликов М. В.**, Кочкина В. Ю., Борисов Н. В., Винокуров А. С., Сосновский А. А., Панарин С. С. / Gaia 19cwm — затменная карликовая новая типа WZ Sge с магнитным белым карликом // Письма в Астрономический журнал. — 2024. — Т. 50, № 11. — С. 723–734. (личный вклад: обработка и анализ данных быстрой фотометрии и спектроскопии, поиск периодичностей, моделирование спектрального распределения энергии, анализ рентгеновских данных).
- A5. **Сусликов М. В.**, Колбин А. И. / Определение параметров слабоаккрецирующего поляра V379 Vir // Известия Крымской астрофизической обсерватории. — 2021. — Т. 117, № 1. — С. 48–55.
- A6. **Suslikov M. V.**, Kolbin A. I., Borisov N. V., Shimansky V. V. / Magnetic Field Study of the Polar V379 Vir // Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century / ed. by I. I. Romanyuk [et al.]. — 2020. — P. 297–298.

Личный вклад автора

Диссертант принимал активное участие на всех этапах выполнения работы. Им выполнена обработка фотометрических и спектральных наблюдений, проведён анализ данных и моделирование, разработаны соответствующие программные алгоритмы. Полученные результаты обсуждались

совместно с научным руководителем. Диссертант также участвовал в написании публикаций по теме диссертации. Во всех результатах, выносимых на защиту, личный вклад автора является основным и определяющим.

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 137 страниц, включая 41 рисунок и 6 таблиц. Список литературы содержит 163 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель работы и основные поставленные задачи. Подчёркнуты элементы научной новизны, а также научная и практическая значимость полученных результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту. Приведено обоснование достоверности результатов работы. Представлены сведения о конференциях, на которых докладывались промежуточные и итоговые результаты, и перечислен список публикаций по теме диссертации. Отдельно отмечен личный вклад автора в проведение исследования. Указан объём работы и её структура.

В **первой главе** представлен краткий обзор КП. Рассмотрены модель Роша и условия массопереноса в тесных двойных системах, основные стадии формирования КП и их последующая эволюция, обусловленная механизмами потери углового момента. Показано, что наблюдательные свойства КП в значительной степени определяются напряжённостью магнитного поля белого карлика и темпом аккреции. Отдельно рассмотрены особенности аккреции в немагнитных КП и магнитных системах, включая полярные и промежуточные полярные, а также короткопериодические системы на поздних стадиях эволюции.

Приведено краткое описание методов исследования магнитных КП, применяемых в работе: доплеровской томографии для восстановления структуры областей формирования эмиссионных линий, анализа зеemannовского расщепления для измерения магнитного поля белого карлика и моделирования циклотронного излучения в приближении нагретой атмосферы для оценки параметров аккреционных пятен и темпов аккреции.

В заключении к главе обобщён рассмотренный материал.

Во **второй главе** представлен комплексный анализ полярного коричневого карлика V379 Vir, находящегося на стадии период-баунсера. Исследование основано на совместном использовании долговременных фотометрических наблюдений в оптическом и инфракрасном диапазонах и фазово-разрешённой спектроскопии.

С использованием каталогов фотометрических обзоров (CSS, ZTF, Pan-STARRS, PTF, NEOWISE), охватывающих около 20 лет наблюдений, изучена долговременная переменность V379 Vir. Показано отсутствие

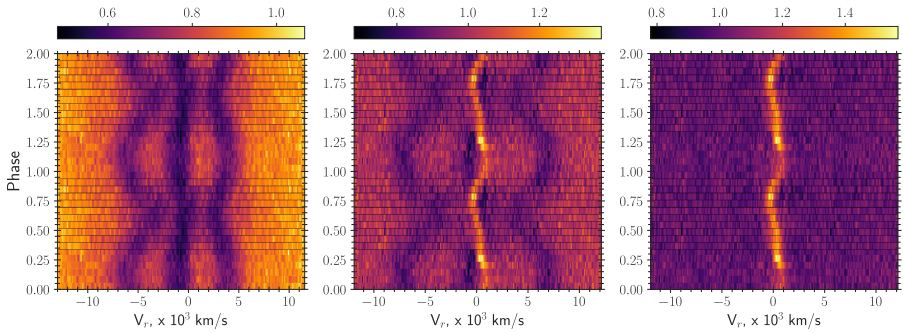


Рисунок 1 — Динамические спектры V379 Vir в линиях H β (слева) и H α до и после вычитания абсорбционной подложки (по центру и справа соответственно). Спектры нормированы на уровень континуума.

выраженных переходов между высокими и низкими состояниями, характерных для большинства полюров, что свидетельствует о длительном пребывании системы в состоянии низкого темпа массопереноса. По данным инфракрасных наблюдений WISE уточнён орбитальный период системы $P_{\text{orb}} = 88.426 \pm 0.001$ мин (здесь и далее неопределённости величин соответствуют уровню 1σ).

На основе моделирования спектрального распределения энергии в ультрафиолетовом, оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах определены параметры компонентов системы. Для белого карлика получены оценки эффективной температуры $T_{\text{eff},1} = 10930 \pm 350$ K, массы $M_1 = 0.61 \pm 0.05 M_{\odot}$ и радиуса $R_1 = 0.012 \pm 0.001 R_{\odot}$. Для донора получены параметры, соответствующие коричневому карлику спектрального класса L6–L8: $T_{\text{eff},2} = 1600 \pm 180$ K и $R_2 = 0.095 \pm 0.018 R_{\odot}$.

По данным инфракрасного телескопа Spitzer выполнено моделирование циклотронного излучения аккреционного пятна в рамках приближения нагретой атмосферы белого карлика в условиях сильного магнитного поля и низкого темпа аккреции. На основе циклотронной и рентгеновской светимости получена оценка полного темпа аккреции $\dot{M} \approx 3 \times 10^{-13} M_{\odot}/\text{год}$, характерная для полюров в низком состоянии. Данный темп массопереноса существенно превышает ожидаемые значения при ветровой аккреции с коричневого карлика, что позволяет интерпретировать V379 Vir как полюр, длительное время находящийся в низком состоянии.

По данным фазово-разрешённой спектроскопии, выполненной на телескопе БТА, исследована орбитальная переменность эмиссионных линий водорода. Анализ динамических спектров (рис. 1) выявил сложную структуру линии H α , которая удовлетворительно описывается двумя компонентами: яркой низкоскоростной и тусклой высокоскоростной. Полуамплитуда лучевых скоростей составила $K_b = 320 \pm 13$ км/с для яркой

компоненты и $K_w = 989 \pm 27$ км/с для тусклой. Установлено, что между компонентами присутствует фазовый сдвиг $\Delta\phi = 0.16 \pm 0.01$. С помощью метода доплеровской томографии восстановлена структура областей формирования эмиссионной линии H α . Показано, что основная часть эмиссии формируется не на поверхности донора, как предполагалось ранее, а в аккреционной струе вблизи точки Лагранжа L_1 . Полученные доплеровские карты указывают на присутствие в системе как баллистической части аккреционного потока, так и области движения вещества вдоль магнитных силовых линий.

На основе анализа зеемановского расщепления линий H α и H β построена магнитная кривая V379 Vir, отражающая изменение наблюдаемого магнитного поля белого карлика в течение вращательного периода. Установлено, что напряжённость магнитного поля изменяется в диапазоне $B \approx 4.5 - 7.5$ МГс. При этом наибольшая напряжённость совпадает с фазой максимума оптического блеска, что согласуется с картиной аккреции газа в окрестности магнитного полюса белого карлика. Выполнено моделирование магнитной кривой в рамках модели смещённого диполя. Полученные результаты свидетельствуют о сложной топологии магнитного поля белого карлика, отличающейся от дипольной конфигурации.

Обсуждается возможная природа V379 Vir и причины низкого темпа аккреции. Показано, что наблюдаемые свойства наиболее согласуются со сценарием длительного пребывания системы в низком состоянии.

В заключении к главе приводятся основные результаты фотометрического и спектроскопического исследования V379 Vir.

Третья глава посвящена оптическому изучению полярa II Leo в низком состоянии, являющегося кандидатом в период-баунсеры. Исследование основано на анализе данных фотометрических каталогов и фазово-разрешённой спектроскопии, полученной на телескопах БТА и VLT в эпохи низкого темпа аккреции.

По данным обзоров CSS, ZTF, PTF, Pan-STARRS и Gaia построена долговременная кривая блеска II Leo, охватывающая около 20 лет наблюдений. Показано, что система демонстрирует характерные для полярных переходы между состояниями с изменением блеска на $\sim 2 - 3^m$. По данным оптической фотометрии ZTF и PTF уточнён орбитальный период системы $P_{orb} = 82.428 \pm 0.001$ мин. На основе наблюдений обсерватории GALEX установлено, что ультрафиолетовая переменность фазово скоррелирована с модуляцией циклотронного источника в оптическом диапазоне, что свидетельствует о формировании данного излучения в окрестности аккреционного пятна.

Выполнено моделирование спектрального распределения энергии II Leo в низком состоянии с использованием моделей атмосфер водородных белых карликов. По данным фотометрии GALEX, Swift/UVOT, ZTF

и Rap-STARRS определены параметры белого карлика: эффективная температура $T_{\text{eff}} = 12700 \pm 360$ К, ускорение силы тяжести $\log g = 8.2 \pm 0.4$, радиус $R_1 = 0.0107 \pm 0.0006 R_{\odot}$ и масса $M_1 = 0.74 \pm 0.05 M_{\odot}$. Обнаружен избыток инфракрасного излучения, связанный с вкладом циклотронного источника и, вероятно, звезды-донора.

Фазово-разрешённая спектроскопия показала, что в оптическом диапазоне присутствуют циклотронные гармоники, положение и интенсивность которых модулируются вращением белого карлика. В спектрах БТА, соответствующих несколько более высокому темпу аккреции, обнаружены эмиссионные линии $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$, $\text{H}\gamma$ и $\text{HeI}(5876)$, практически отсутствующие в данных VLT. Анализ динамического спектра линии $\text{H}\alpha$ показал, что её профиль описывается комбинацией узкой и широкой компонент с полуамплитудами лучевых скоростей $K_n = 344 \pm 21$ км/с и $K_b = 871 \pm 63$ км/с соответственно. Доплеровская томография линии $\text{H}\alpha$ выявила наличие аккреционной структуры, при этом распределение источников эмиссии указывает на преимущественное формирование излучения в аккреционной струе, а не на облучённой поверхности звезды-донора.

По зеемановскому расщеплению бальмеровских линий выполнена оценка средней напряжённости магнитного поля белого карлика. Для данных VLT и БТА получены близкие значения $B = 40.7 \pm 0.5$ МГс и $B = 40.3 \pm 1.2$ МГс соответственно.

Для определения параметров аккреции выполнено моделирование фазово-разрешённых спектров (рис. 2) в рамках приближения нагретой атмосферы с использованием модели аккреционного пятна, учитывающей его геометрию и вращательную модуляцию циклотронного излучения. Получено, что параметры по данным БТА и VLT в целом согласуются между собой, тогда как различие в долготе пятна может быть связано с изменением положения области перехода на магнитную траекторию. Определены координаты и относительная площадь $f \approx 1.5 \times 10^{-3}$ аккреционного пятна на поверхности белого карлика, а также наклонение оси вращения $i \approx 69^\circ$. Найдено, что полный темп аккреции в эпоху наблюдений БТА составил $\dot{M} \approx 4.1 \times 10^{-13} M_{\odot}/\text{год}$, а для наблюдений VLT — $\dot{M} \approx 2.5 \times 10^{-13} M_{\odot}/\text{год}$.

Представлено обсуждение рентгеновских данных IL Leo, полученных на телескопе SRG/eROSITA. Показано, что в промежуточном состоянии темп аккреции возрастает примерно на порядок по сравнению с низким состоянием и достигает $\dot{M} \sim 6 \times 10^{-12} M_{\odot}/\text{год}$ при учёте как тормозного рентгеновского, так и циклотронного охлаждения плазмы.

В заключении к главе приводится обобщение полученных результатов по исследованию кандидата в магнитные период-баунсеры IL Leo в низком состоянии и подчёркивается его сходство с хорошо изученным аналогом EF Eri.

В четвертой главе представлено фотометрическое и спектроскопическое исследование транзита Gaia 19cwm. На основе анализа данных

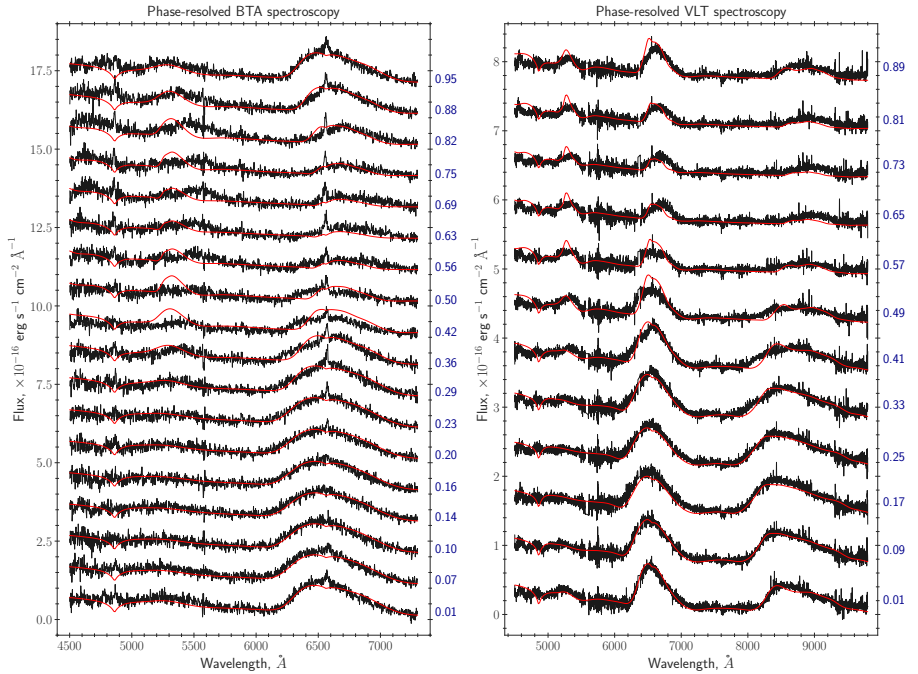


Рисунок 2 — Описание оптических фазовых спектров II Leo, полученных на телескопах БТА (слева) и VLT (справа), на основе модели аккреционного пятна, модулированного вращением. Теоретические спектры включают переменное циклотронное излучение пятна и постоянный поток от белого карлика. Орбитальные фазы моментов наблюдений указаны вдоль правой оси ординат. Спектры смещены по вертикали на постоянную величину.

наблюдений показано, что объект относится к редкому подклассу затменных карликовых новых типа WZ Sge и содержит магнитный белый карлик, что позволяет классифицировать систему как промежуточный поляр.

В начале главы рассмотрены наблюдательные данные и методы их обработки. Для исследования использованы фотометрические наблюдения, выполненные на телескопах Цейсс-1000 CAO РАН и ЗТШ КраО, а также спектральные наблюдения, полученные на 6-м телескопе БТА с прибором SCORPIO-1. Кроме того, привлечены архивные данные обзоров ZTF, Gaia, ATLAS, Pan-STARRS, PTF и ASAS-SN, что позволило построить долговременную кривую блеска системы, охватывающую около 15 лет наблюдений.

Анализ фотометрии показал, что Gaia 19swm демонстрировал сверхвспышку амплитудой около 6^m и продолжительностью $\sim 12 - 14$ сут, а также два последующих поярчания. Эти свойства характерны для систем типа WZ Sge. По данным ZTF найден орбитальный период системы

$P_{\text{orb}} = 86.32$ мин. В кривых блеска обнаружена устойчивая внезатменная переменность с периодом около 6.45 мин, сохраняющаяся на протяжении не менее четырёх лет. Стабильность этого периода позволила связать его с вращением белого карлика и сделать вывод о магнитной природе аккректора. Внезатменные фазовые кривые блеска имеют двухгорбую структуру, что указывает на двухполюсный режим аккреции.

Кривые блеска с высоким временным разрешением позволили выделить затмения белого карлика и горячего пятна, а также определить из анализа их профилей ширину затмений и продолжительность входа и выхода. Кроме того, обнаружена орбитальная модуляция блеска вне затмения с амплитудой $\Delta I_c \approx 0.^m15$, которая может быть связана либо с эллипсoidalностью донора, либо со структурой аккреционного диска.

Спектры содержат типичный для КП набор эмиссионных линий водорода и гелия, а также широкие фотосферные абсорбции белого карлика. Доплеровские томограммы в линиях $\text{H}\beta$ и $\text{H}\gamma$ (рис. 3) показали наличие аккреционного диска и горячего пятна, формирующегося в области взаимодействия аккреционной струи с диском. Анализ лучевых скоростей по крыльям эмиссионных линий не выявил явного орбитального движения внутренних частей аккреционного диска, связанных с белым карликом, что может быть обусловлено низким отношением масс.

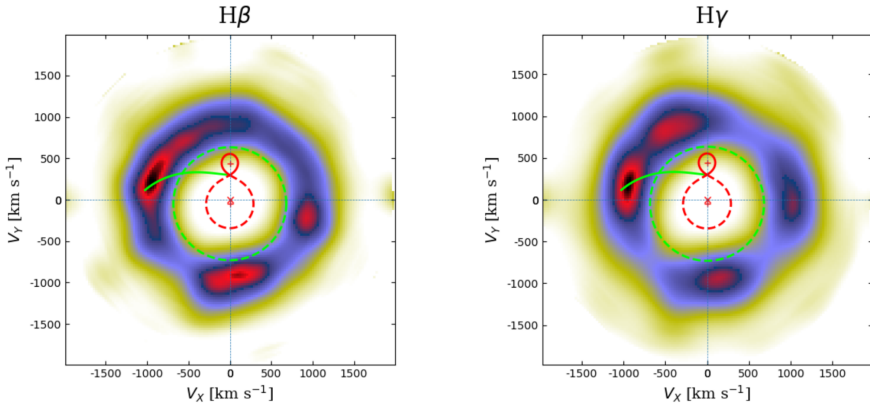


Рисунок 3 — Доплеровские томограммы Gaia 19swm в линиях $\text{H}\beta$ (слева) и $\text{H}\gamma$ (справа). Нанесены кривые, соответствующие положениям полостей Роша главного (красная пунктирная линия) и вторичного (красная сплошная линия) компонентов в пространстве скоростей, а также баллистическая траектория частиц, истекающих из точки Лагранжа L_1 (зелёная сплошная линия). Зелёной пунктирной окружностью обозначены скорости частиц на круговой орбите вокруг белого карлика на радиусе резонанса 3 : 1.

На основе анализа профиля затмения получены оценки основных параметров системы. Найдены отношение масс компонент $q = 0.11 \pm 0.02$ и наклонение орбиты $i = 83.8 \pm 1.1^\circ$. Продолжительность входа в затмение позволила оценить радиус и массу белого карлика $M_1 = 0.66 \pm 0.06 M_\odot$. Масса донора при этом составила $M_2 = 0.073 \pm 0.015 M_\odot$, что указывает на близость системы к стадии период-баунсера.

Для определения параметров атмосферы аккректора выполнено моделирование спектрального распределения энергии по данным GALEX, Swift/UVOT, Pan-STARRS и ZTF с использованием моделей атмосфер водородных белых карликов. Полученная эффективная температура белого карлика составила около 13000 К, что согласуется с параметрами КП с короткими орбитальными периодами.

Отдельный раздел посвящён рентгеновским данным Gaia 19cwm, полученным на телескопе Swift/XRT. Рентгеновский спектр был описан моделью тормозного излучения оптически тонкой плазмы с межзвёздным поглощением. Получена рентгеновская светимость $L_X \approx 1.6 \times 10^{31}$ эрг/с и оценён темп аккреции порядка $10^{-12} M_\odot/\text{год}$.

Также обсуждается эволюционный статус и физическая природа источника. Уникальные свойства системы представляют особый интерес для изучения эволюции магнитных КП в области минимального орбитального периода.

В заключении к главе перечислены основные результаты исследования системы Gaia 19cwm.

В **заключении** обобщаются основные выводы исследования трёх магнитных КП с низким темпом аккреции, находящихся на поздних этапах эволюции. Представленные результаты расширяют представления о физических свойствах систем вблизи стадии период-баунсера, структуре аккреционных потоков и особенностях аккреции в условиях сильного магнитного поля белого карлика и низкого массопереноса.

Список литературы

1. Warner, B. Cataclysmic variable stars. Vol. 28 / B. Warner. — Cambridge University Press, 1995.
2. Hellier, C. Cataclysmic Variable Stars / C. Hellier. — Springer, 2001.
3. Cropper, M. The Polars / M. Cropper // Space Science Reviews. — 1990. — Dec. — Vol. 54, no. 3/4. — P. 195—295.
4. Patterson, J. The DQ Herculis Stars / J. Patterson // The Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 1994. — Mar. — Vol. 106. — P. 209.

5. Evidence for Intermediate Polars as the Origin of the Galactic Center Hard X-ray Emission / C. J. Hailey [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2016. — Aug. — Vol. 826, no. 2. — P. 160.
6. *Hameury, J.-M.* Dwarf nova outbursts in intermediate polars / J.-M. Hameury, J.-P. Lasota // Astronomy & Astrophysics. — 2017. — June. — Vol. 602. — A102.
7. Search for Magnetic Accretion in SW Sextantis Systems / I. J. Lima [et al.] // The Astronomical Journal. — 2021. — May. — Vol. 161, no. 5. — P. 225.
8. *Knigge, C.* The Evolution of Cataclysmic Variables as Revealed by Their Donor Stars / C. Knigge, I. Baraffe, J. Patterson // The Astrophysical Journal Supplement. — 2011. — June. — Vol. 194, no. 2. — P. 28.
9. No cataclysmic variables missing: higher merger rate brings into agreement observed and predicted space densities / D. Belloni [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — Aug. — Vol. 478, no. 4. — P. 5626—5637.
10. A Volume-limited Sample of Cataclysmic Variables from Gaia DR2: Space Density and Population Properties / A. F. Pala [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — May. — Vol. 494, no. 3. — P. 3799—3827.
11. Cataclysmic Variables from Sloan Digital Sky Survey - V. The search for period bouncers continues / K. Inight [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2023. — Nov. — Vol. 525, no. 3. — P. 3597—3625.
12. *Ferrario, L.* Magnetic White Dwarfs / L. Ferrario, D. de Martino, B. T. Gänsicke // Space Science Reviews. — 2015. — Oct. — Vol. 191, no. 1—4. — P. 111—169.
13. Binary star origin of high field magnetic white dwarfs / C. A. Tout [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2008. — June. — Vol. 387, no. 2. — P. 897—901.
14. Post common envelope binaries from the SDSS. VI. SDSS J120615.73+510047.0: a new low accretion rate magnetic binary / A. D. Schwope [et al.] // Astronomy & Astrophysics. — 2009. — June. — Vol. 500, no. 2. — P. 867—872.
15. Evidence for reduced magnetic braking in polars from binary population models / D. Belloni [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Feb. — Vol. 491, no. 4. — P. 5717—5731.
16. The origin and evolution of magnetic white dwarfs in close binary stars / M. R. Schreiber [et al.] // Nature Astronomy. — 2021. — Apr. — Vol. 5. — P. 648—654.

17. *Castro-Tapia, M.* Magnetic Field Evolution for Crystallization-driven Dynamos in C/O White Dwarfs / M. Castro-Tapia, S. Zhang, A. Cumming // The Astrophysical Journal. — 2024. — Nov. — Vol. 975, no. 1. — P. 63.
18. Main sequence dynamo magnetic fields emerging in the white dwarf phase / M. Camisassa [et al.] // Astronomy & Astrophysics. — 2024. — Nov. — Vol. 691. — P. L21.
19. SDSS unveils a population of intrinsically faint cataclysmic variables at the minimum orbital period / B. T. Gänsicke [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2009. — Aug. — Vol. 397, no. 4. — P. 2170—2188.
20. *Pretorius, M. L.* The space density of magnetic cataclysmic variables / M. L. Pretorius, C. Knigge, A. D. Schwope // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2013. — June. — Vol. 432, no. 1. — P. 570—583.
21. Informing the Cataclysmic Variable Sequence from Gaia Data: The Orbital-period-Color-Absolute-magnitude Relationship / E. S. Abrahams [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2022. — Oct. — Vol. 938, no. 1. — P. 46.
22. White dwarf masses and nova efficiency in magnetic cataclysmic variables. / J. M. Hameury [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1989. — Apr. — Vol. 237. — P. 835—844.
23. *Webbink, R. F.* Cataclysmic variable evolution: AM Her binaries and the period gap / R. F. Webbink, D. T. Wickramasinghe // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2002. — Sept. — Vol. 335, no. 1. — P. 1—9.
24. *Townsley, D. M.* Cataclysmic Variable Primary Effective Temperatures: Constraints on Binary Angular Momentum Loss / D. M. Townsley, B. T. Gänsicke // The Astrophysical Journal. — 2009. — Mar. — Vol. 693, no. 1. — P. 1007—1021.
25. *Schreiber, M. R.* Period bouncers as detached magnetic cataclysmic variables / M. R. Schreiber, D. Belloni, J. van Roestel // Astronomy & Astrophysics. — 2023. — Nov. — Vol. 679. — P. L8.