

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.Ломоносова
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Масленникова Наталия Андреевна

**Быстрая фотометрическая и спектральная переменность
симбиотических звезд**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Татарников Андрей Михайлович

Москва — 2026

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Автоматизация телескопов	20
1.1 Программа управления телескопами	22
1.2 Удержание звезд на кадре	27
1.3 Красная утечка	31
Глава 2. Фотометрический фликкер-эффект	38
2.1 Наблюдения	39
2.2 Периодограмма Ломба-Скаргла	41
2.3 Вейвлет-анализ	44
2.4 Применение диаграмм Ломба-Скаргла и вейвлет-анализа к кривым блеска симбиотических звезд	45
2.5 Симбиотические звезды без фликкер-эффекта	47
2.5.1 Классические симбиотические звезды	47
2.5.2 Симбиотические новые	58
2.5.3 Повторные симбиотические новые	60
2.5.4 Малоизученные симбиотические звезды и кандидаты в симбиотические звезды	62
2.6 Симбиотические звезды с фликкер-эффектом	65
Глава 3. Спектральный фликкер-эффект	78
3.1 Спектральные наблюдения	78
3.2 Спектральные и спектрофотометрический мониторинги Т CrB . .	82
3.3 Спектральный мониторинг Y Gem	90
3.4 Спектральные мониторинги LAMOST J122804.90-014825.7 и Миры	92
Глава 4. Новые симбиотические звезды	96
4.1 CSS 1102	97
4.2 V520 And	103
4.3 2MASS J21012803+4555377	116

	Стр.
4.4 AS 357	122
Заключение	133
Список литературы	137
Список рисунков	157
Список таблиц	165

Введение

Симбиотические звезды — это двойные взаимодействующие системы, в спектрах которых присутствуют полосы поглощения, характерные для гигантов поздних спектральных классов, и эмиссионные линии ионов с высокими потенциалами ионизации. Впервые они были выделены в отдельный класс в начале 20 века Энни Джамп Кэннон, когда она отнесла к новому классу Z And, RX Pup, RS Oph и Y CrA [1]. Сейчас к симбиотическим звездам относят около 300 систем [2], но, согласно оценкам, их число в Галактике может составлять от 3 000 до 30 000 [3; 4] и даже до $4 \cdot 10^5$ [5].

Проработанная модель, наиболее полно описывающая спектры симбиотических звезд — двойная система, состоящая из гиганта позднего спектрального класса и белого карлика, окруженная туманностью из вещества ветра холодного компонента, ионизованного излучением горячего компонента, была впервые рассмотрена в работах [3; 6]. При этом без подробных расчетов двойную звездную систему для описания феномена симбиотической звезды было предложено использовать в работе [7]. Иногда в качестве горячего компонента выступает нейтронная звезда [8], например, в системах Sct X-1, IRXS J180431.1-273932, IGR J16393-4643 и др. (см., например, [9]).

Симбиотические звезды из-за существования в одной системе очень разных и взаимодействующих компонентов: холодного красного гиганта и горячего компактного объекта являются уникальными астрофизическими лабораториями, позволяющими изучать явления, происходящие при взаимодействии звездных компонентов, их ветров и излучений. Симбиотические звезды демонстрируют переменность на различных временных и энергетических масштабах: вспышки классических симбиотических звезд (амплитуда составляет до 3 mag, вспышки происходят раз в несколько лет), повторных новых (амплитуда вспышек составляет около 6 mag, время между вспышками — десятилетия), симбиотических новых (у систем такого типа за всю историю наблюдений наблюдалась одна вспышка с амплитудой ~ 10 mag), пульсации красного гиганта (мириды или полуправильные переменные), эллипсоидальная переменность

(красный гигант заполняет свою полость Роша, при орбитальном движении наблюдатель видит разную площадь поверхности звезды с разным распределением температуры), фликкер-эффект (наблюдается у малого числа систем, возможно, связан с переменностью вязкости в аккреционном диске). У небольшого числа систем наблюдается несколько видов вспышек, например, как у классических симбиотических звезд и как у симбиотических новых.

Важность изучения механизмов аккреции в симбиотических звездах (происходит ли она через аккрецию ветра (Бонди-Хойла) или через аккреционный диск) в том числе связана с тем, что они рассматриваются как возможные прародители сверхновых типа Ia. Модельные расчеты [10; 11] показывают, что эволюция симбиотических звезд может приводить к образованию вспышки сверхновых по двум каналам: аккреция с последующим термоядерным взрывом белого карлика или слияние двух белых карликов в конце эволюции.

В последнее время возник интерес к симбиотическим звездам как к прародителям систем сливающихся белых карликов [10], от которых в будущем возможно зарегистрировать гравитационно-волновой сигнал.

Существование аккреционных дисков подтверждено при спектральных наблюдениях повторных симбиотических новых [12; 13]. У классических симбиотических звезд (наиболее многочисленного класса этих систем) в спокойном состоянии происходит горение водородной оболочки на поверхности белого карлика. Это требует очень узкого диапазона темпа аккреции, который мог бы обеспечить аккреционный диск, но он не регистрируется у этих систем в спокойном состоянии (при этом в активном состоянии признаки существования аккреционного диска наблюдаются). До сих пор не для всех симбиотических звезд известно, происходит ли в них аккреция из ветра или через аккреционный диск, бывают ли переходы между этими случаями аккреции. Механизмы переноса массы, вероятно, зависят от типа донора, поскольку скорость потери массы ветром у гиганта и степень, с которой он заполняет свою полость Роша, зависят от его эволюционного состояния [14]. Открытым остается вопрос о том, как влияет механизм переноса массы на существование аккреционного диска, его размер, стабильность и структуру. Также сравнение аккреционных и протопланетных дисков покажет, возможно ли образование вторичных планет вокруг белого карлика в симбиотических звездах, как было предложено в работе [15].

До сих пор не ясна роль симбиотических звезд в понимании химической эволюции Галактики. На асимптотической ветви гигантов происходит синтез

элементов s-процесса. Так как красные гиганты в двойных системах теряют вещество гораздо быстрее одиночных (особенно при заполнении своей полости Роцца), это может приводить к уменьшению доли углерода в выбрасываемом в межзвездную среду веществе [16]. Также, возможно, симбиотические звезды являются прародителями бариевых звезд [17]. При термоядерных вспышках повторных новых образуются тяжелые элементы, поступающие в межзвездную среду. Сложность в оценке влияния симбиотических звезд на химическую эволюцию Галактики связана в том числе и с тем, что их число не известно — по разным оценкам количество симбиотических звезд составляет от 3000 до $4 \cdot 10^5$.

Для надежного моделирования эволюции симбиотических звезд и получения теоретических оценок количества таких систем не хватает знаний базовых параметров (прежде всего периодов обращений и масс компонентов) достаточного числа симбиотических звезд.

Среди всего множества явлений, наблюдающихся у симбиотических звезд, быстрая переменность блеска (или фликкер-эффект) относится к наименее изученным. Это связано как со сложностями наблюдательного характера, так и с тем, что фликкер-эффект наблюдается далеко не у всех симбиотических звезд. Надежно подтверждено наличие этого эффекта всего у примерно 20 систем. Причем у большинства из них он регистрируется не всегда.

Точная физическая причина фликкер-эффекта неизвестна. Существует несколько моделей, объясняющих его происхождение. Наиболее распространенной и подтвержденной наблюдениями является модель, предложенная в работе [18], которая связывает возникновение фликкер-эффекта с изменением темпа переноса массы в аккреционном диске. В стандартной модели аккреционного диска Шакуры-Сюняева [19; 20] параметр турбулентности α обычно считается постоянным для всего диска. В работе [18] было предположено, что фликкер-эффект возникает из-за локальных колебаний α . Изменения параметра турбулентности могут быть связаны с магнитными напряжениями, которые могут быть переменными в результате динамических процессов, или с вязкой неустойчивостью из-за движения частиц в диске по вытянутым орбитам [21]. На радиусах много больше внутреннего радиуса диска, где происходит основное выделение энергии, происходят процессы, приводящие к изменению α , следовательно, темпа аккерции. Когда эти вариации, возникающие во внешних областях аккреционного диска и поэтому имеющие большое характерное время фликкер-эффекта, движутся через диск к его внутренней границе, поверх них

накладывается переменность с все более коротким характерным временем при уменьшении радиуса и сокращении временных масштабов вязкости. Возникает наблюдаемый фликкер-эффект. Таким образом, в модели [18] флуктуации темпа аккреции возникают в широком диапазоне радиусов и, соответственно, в широком диапазоне характерных времен, затем они распространяются внутрь, модулируя рентгеновское (если центральный компактный объект является нейтронной звездой) или ультрафиолетовое или оптическое (если центральный объект является белым карликом) излучение, возникающее в центральных областях аккреционного диска.

Быстрая переменность блеска — важный инструмент исследования аккреционных дисков или горячих компонентов (для случая переменности по типу промежуточных полярнов) в симбиотических звездах. Фликкер-эффект позволяет получить физические параметры аккреционных дисков, что важно для понимания эволюции систем и механизмов вспышек разных типов. Но для изучения фликкер-эффекта у симбиотических звезд существует несколько сложностей: очень малое число систем, демонстрирующих этот тип переменности, причем фликкер-эффект регистрируется не все время, иногда он пропадает, а также необходимость получения высокоточных фотометрических данных (желательно в коротковолновом диапазоне спектра). Поэтому в настоящее время идет активное накопление наблюдательных данных и открытие новых систем. В том числе этому посвящена данная диссертация.

Фликкер-эффект имеет похожие свойства в различных объектах, например, таких как катаклизмические переменные [22], активные ядра галактик [23], рентгеновские двойные [24], молодые звезды [22]. Поэтому его изучение в симбиотических звездах может внести вклад в понимание физических механизмов ответственных за его возникновение.

Цели диссертационной работы

Целью диссертационной работы является поиск новых симбиотических звезд с эффектом быстрой переменности, определение параметров как самого эффекта, так и компонентов систем, его демонстрирующих.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- Разработка программного обеспечения для автоматизации малых телескопов.
- Разработка методики учета красной утечки фильтров U и B при наблюдении симбиотических звезд.
- Поиск и исследование фликкер-эффекта у симбиотических звезд различных классов.
- Исследование кандидатов в симбиотические звезды, подтверждение их симбиотической природы и наличия или отсутствия эффекта быстрой переменности.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются фликкер-эффект у симбиотических звезд и аккреционные диски в этих системах. Предметом исследования являются результаты фотометрических и спектральных наблюдений симбиотических звезд в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

Методология исследования

Для решения поставленных в работе задач были использованы как общенаучные методы — анализ, дедукция, индукция, так и специальные — фотометрические и спектральные наблюдения, анализ временных рядов методами Ломба-Скаргла и вейвлет-анализа. Для обработки и анализа данных использовались общепризнанные в научной среде библиотеки и программы (такие как Astropy, Pandas, PhotUtils, SciPy, NumPy, Astrometry, ASTAP и др.), а также программы, написанные автором самостоятельно с использованием опробованных сообществом библиотек и процедур.

Научная новизна

- Указанные результаты получены и опубликованы автором впервые.
- Разработана и опробована методика учета красной утечки фильтров U и B для редукции фотометрических наблюдений симбиотических звезд.
 - Получены амплитуды фликкер-эффекта симбиотической повторной новой Т CrB в различных состояниях горячего компонента и аккреционного диска.
 - Для Т CrB было получено, что быстрая переменность потока в линиях $H\alpha$ и $H\beta$ во время наблюдений в 2020 г. и в 2023 г. не превышала 15%, тогда как в линиях He I и He II амплитуда переменности была значительно выше и достигала 60%.
 - Обнаружена быстрая спектральная и фотометрическая переменность у открытой нами симбиотической звезды V520 And. Показано, что амплитуды быстрой переменности в линиях $H\alpha$ и $H\beta$ составляют $< 15\%$, а в линиях He I до 60%.
 - Обнаружены временные задержки быстрой переменности между потоками в различных линиях в спектре Т CrB, которые связаны с различным расстоянием от источника быстрой переменности до области формирования эмиссионных линий и различной оптической глубиной для излучения в линиях. Было показано, что фликкер-эффект в эмиссионных линиях связан с быстрой переменностью, регистрируемой в полосе B .
 - Открыты новые симбиотические звезды CSS1102, V520 And и 2MASS J21012803+4555377, открыт фликкер-эффект у CSS1102 и V520 And.

Теоретическая и практическая значимость

В нашей стране (и в целом в мире) до сих пор существует достаточно большой парк старых, не автоматизированных так называемых «малых телескопов» — инструментов с диаметрами зеркал 0.4–0.8 м (например, Цейсс-600,

АЗТ разных типов). Наблюдения, проводимые с ними в ручном режиме, имеют низкую эффективность с точки зрения расходования наблюдательного времени и могут иметь невысокую фотометрическую точность из-за отсутствия автоматизации. Исправление этой ситуации путем автоматизации телескопов и процесса наблюдений позволяет повысить эффективность и, главное, точность. Особенно это важно в применении к теме исследования таких малоамплитудных явлений, как, например, фликкер-эффект и транзиты экзопланет.

Разработанная методика учета красной утечки позволит корректировать этот эффект не только для наблюдений симбиотических звезд, но и для любых объектов с большим показателем цвета и возможным наличием избытка коротковолнового излучения, что важно, например, при наблюдении звезд на поздних стадиях эволюции, молодых звезд с пылевой оболочкой.

Среди всего множества явлений, наблюдающихся у симбиотических звезд, быстрая переменность блеска (или фликкер-эффект) относится, по нашему мнению, к наименее изученным. Это связано как со сложностями наблюдательного характера, так и с тем, что фликкер-эффект наблюдается далеко не у всех симбиотических звезд. Надежно подтверждено наличие этого эффекта всего у примерно 20 систем. Причем у большинства из них он регистрируется не всегда.

Фликкер-эффект — это важный инструмент исследования аккреционных дисков или горячих компонентов (для случая переменности по типу промежуточных поляр). Увеличение числа симбиотических систем, для которых известны параметры быстрой переменности, способствует развитию теоретических представлений о роли аккреционных дисков в развитии вспышечной активности и общей эволюции этих систем.

Открытие новых симбиотических звезд позволяет добавить объекты в немногочисленный класс симбиотических звезд и сократить различие между наблюдаемым количеством этих систем и теоретическими оценками. Новые подтвержденные симбиотические звезды позволят улучшить алгоритмы классификации симбиотических звезд, повысить точность их выделения из объектов других классов, поспособствуют поиску т.н. «спящих» симбиотических звезд.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика коррекции «красной утечки» фильтров U и B позволяет правильно оценивать амплитуду быстрой переменности.
2. Амплитуда быстрой переменности Т CrB в сверхактивном состоянии в 2016-2023 годах составляла 0.08 – 0.26 mag. В июне 2023 года в начале минимума, предшествовавшего возможной следующей вспышке новой, амплитуда была равна 0.07 mag.
3. Т CrB и V520 And обладают быстрой переменностью в линиях бальмеровской серии водорода и в линии He I $\lambda 5876$, а также дополнительно Т CrB обладает быстрой переменностью в линии He II $\lambda 4686$. Амплитуда переменности в бальмеровских линиях не превышает 15%, тогда как в линиях He I и He II она достигает 30–60%.
4. В сверхактивном состоянии у Т CrB поток в линии H β опережает вариации в H α на 228 ± 28 секунд, в линии He I $\lambda 5876$ — на 500 ± 70 секунд, а в линии He II $\lambda 4686$ — на 595 ± 28 секунд. Фликкер-эффект в полосе B обусловлен переменностью континуума аккреционного диска и совпадает по фазе с изменениями потока, происходящими в H β .
5. CSS1102, V520 And и 2MASS J21012803+4555377 являются симбиотическими звездами. CSS1102 и V520 And обладают фликкер-эффектом.

Личный вклад автора

Результаты диссертационной работы опубликованы в 7 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

В статьях 1 (личный вклад 75%), 2 (личный вклад 75%) автор является первым автором и выполнил большую часть работы. В статье 3 (личный вклад 50%) автор проводил обработку и анализ УФ и спектральных наблюдений. В статье 4 (личный вклад 40%) автор разработал методику учета влияния красной утечки на кривые блеска симбиотических звезд. В статье 5 (личный вклад 50%) автор проводил обработку наблюдений, моделирование спектров и

построение эволюционных треков. В статьях 6 (личный вклад 20%) и 7 (личный вклад 20%) автор проводил необходимые для выполнения работы наблюдения и их обработку.

Степень достоверности результатов

Диссертация опирается на методы обработки и интерпретации данных, описанные в различных учебниках, книгах и рецензируемых статьях, посвященных обработке и анализу фотометрических и спектроскопических наблюдений. При обработке применялись стандартные процедуры и методы для этой области практической астрофизики, признанные научным сообществом. Полученные результаты и выводы сравнивались (там, где это возможно) с результатами других авторов, опубликованными в рецензируемых изданиях. Основные результаты представляемой работы прошли апробацию и были опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах.

Апробация работы

1. Всероссийская астрономическая конференция — 2021 (ВАК — 2021) «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», устный доклад, «Подтверждение симбиотической природы звезды CSS1102 на основании спектральных и фотометрических наблюдений, проведенных в КГО ГАИШ», ГАИШ МГУ, 23.08.2021
2. Вторая Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых «Астрономия и исследование космического пространства», устный доклад, «Оптический фликкер-эффект у симбиотических звезд CSS 1102 и DQ Ser», онлайн, 01.02.2022
3. Современная звездная астрономия — 2022, устный доклад, «Исследование быстрой переменности T Северной Короны», КГО ГАИШ МГУ, 08.11.2022

4. Всероссийская конференция с международным участием «Физика звезд: теория и наблюдения», устный доклад, «Исследования Т Северной Короны во время состояния высокой активности», ГАИШ МГУ, 28.06.2023
5. Всероссийская астрономическая конференция ВАК — 2024 «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр», устный доклад, «Исследование повторной новой Т Северной Короны на разных этапах перед вспышкой», САО РАН, 27.08.2024
6. XXII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», устный доклад, «V520 And — новая симбиотическая звезда с фликкер-эффектом», ИКИ РАН, 21.04.2025
7. «Современная астрономия: наука и образование (к 270-летию Московского Университета)», устный доклад, «Четыре новые симбиотические звезды», ГАИШ МГУ, 24.06.2025
8. Всероссийская конференция с международным участием «Физика звёзд в эпоху многоволновых наблюдений», устный доклад, «Поиск новых симбиотических звезд», СПбГУ, 25.09.2025

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 166 страниц, включая 61 рисунок и 29 таблиц. Список литературы содержит 198 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Описаны цели и задачи исследования, дается характеристика научной новизны работы, а также научной и практической значимости полученных результатов. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Указан личный вклад автора, приведен список опубликованных статей, а также конференций, на которых были представлены результаты, легшие в основу диссертации. Изложена структура и новизна работы, а также краткое содержание диссертации.

В **Главе 1** описаны алгоритмы автоматизации 60-см телескопов ГАИШ МГУ. Для облегчения работы оператора программы управления сделаны по-

хожими, несмотря на различия между телескопами. Разработано 3 режима наблюдений: 1) с оператором, находящимся в башне, 2) с удаленным оператором, 3) автоматические наблюдения. В программе управления телескопом реализованы функции наведения телескопа на объект по показаниям энкодеров в экваториальных и альт-азимутальных координатах, точная (лучше 10 arcsec) постановка объекта в центр поля зрения, с использованием астрометрии по полученному кадру. Реализована функция для автоматической фокусировки.

Обычные наблюдения после автоматизации выглядят следующим образом: в начале наблюдений купол и зеркало телескопа открываются, выбирается объект, телескоп наводится по энкодерам, затем доводится, используя астрометрию, начинается съемка объекта, затем происходит наведение на следующий объект и т.д. Если портится погода или высота Солнца над горизонтом становится больше -12° , наблюдения останавливаются, крышки зеркала закрываются, телескоп паркуется. Купол закрывается и паркуется для зарядки аккумуляторов. Автоматические наблюдения отличаются от наблюдений с оператором тем, что программа следит за погодой по данным метеостанции и объекты выбираются программой управления из заранее заданного сценария, содержащего все объекты из заявок на наблюдения.

Также в главе 1 подробно рассмотрены алгоритмы, реализующие субпиксельные коррекции положения трубы телескопа во время мониторингов. Только при удержании звезды на одних и тех же пикселях в течение всего мониторинга возможно достичь предельной точности фотометрии 0.001 mag. Показано, что с помощью пакета DONUTS, сравнивая опорный кадр с только что полученным, можно достичь субпиксельной точности ведения. Разработаны алгоритмы для фильтрации горячих пикселей, мешающих работе DONUTS, и для применения этого пакета к бедным звездным полям.

В этой главе описана методика коррекции красной утечки фильтров U и B при обработке наблюдений симбиотических звезд, полученных на 0.6-м телескопе RC600 Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Показано, что в полосе U вклад красной утечки становится заметным при показателе цвета объекта $V - Rc > 0.4$, в полосе B — при $V - Rc > 1.0$. Величина красной утечки для заданных кривых пропускания фильтров зависит от класса светимости объекта, межзвездного покраснения, воздушной массы. Показано, что для симбиотических звезд, у которых в голубой области нет вклада горячего компонента или аккреционного диска, можно использовать зависимости величины красной утеч-

ки от показателя цвета, полученные для одиночных звезд. Для симбиотических звезд, у которых в голубой области есть отличия от одиночных звезд, разработана методика учета красной утечки: вычисляется число фотонов красной утечки, звездная величина объекта переводится в поток, из которого вычитаются фотоны красной утечки, затем исправленные потоки переводятся обратно в звездные величины. Показано, что коррекция этого эффекта позволяет правильно оценивать амплитуды фликкер-эффекта симбиотических звезд.

В **Главе 2** описываются фотометрические наблюдения, проведенные с целью поиска и исследования фликкер-эффекта у симбиотических звезд различных классов. Показано, что применение периодограммы Ломба-Скаргла и вейвлет-анализа к кривым блеска симбиотических звезд позволяет подтвердить или опровергнуть наличие быстрой переменности у этих систем. В главе 2 описываются наблюдения 42 объектов на предмет поиска эффекта быстрой переменности. Из этого числа у 11 классических, 4 новых, 1 повторной новой, 10 малоизученных симбиотических звезд и 12 кандидатов фликкер-эффект в наших фотометрических наблюдениях обнаружен не был. У 4 симбиотических звезд был зарегистрирован фликкер-эффект. Описаны выполненные фотометрические наблюдения повторной новой Т CrV в разных состояниях перед возможной следующей вспышкой повторной новой. Показано, что амплитуда фликкер-эффекта не изменилась при переходе системы из спокойного состояния в сверхактивное. Она упала более чем в 3 раза в минимуме блеска системы, затем при возвращении блеска системы к значениям как в сверхактивном состоянии, амплитуда фликкер-эффекта также увеличилась до наблюдаемых в этом состоянии значений. Показана зависимость наличия быстрой переменности у СН Cug от выбросов пыли в системе, после появления пыли в системе фликкер-эффект не регистрируется. Также в главе описаны наблюдения фликкер-эффекта у недавно открытой симбиотической звезды SU Lup. Он отсутствовал в 2021 – 2024 гг. В 2025 г. быстрая переменность была зарегистрирована с амплитудой 0.38 mag в полосе U . Впервые фликкер-эффект был зарегистрирован у малоизученной симбиотической звезды DQ Ser в 2021 г.

В **Главе 3** рассмотрены спектральные мониторинги симбиотических звезд. Описана методика их обработки. Показано, что у Т CrV быстрая переменность регистрируется в линиях $H\alpha$, $H\beta$, He I (λ 5876) и He II (λ 4686). Была определена амплитуда переменности: в линиях бальмеровской серии водорода она составляет не более 15%, в линиях гелия амплитуда значительно больше

и составляет до 60%. В главе показано, что переменность в линиях связана с переменностью в континууме, которая регистрируется при фотометрических наблюдениях. Также были определены задержки между фликкер-эффектом в разных линиях. В главе описан спектральный мониторинг γ Gem, в течение которого была зарегистрирована быстрая переменность в линиях $H\alpha$, $H\beta$ и $He\ I$ ($\lambda\ 5876$). Также как и в случае Γ CrB амплитуда фликкер-эффекта в линии $He\ I$ значительно превосходит амплитуду переменности в линиях бальмеровской серии водорода, присутствуют временные задержки между переменностью в различных линиях. У симбиотических звезд LAMOST J122804.90–014825.7 и Миры фликкер-эффект зарегистрирован не был.

В **Главе 4** описано открытие четырех новых симбиотических звезд: CSS 1102, V520 And, 2MASS J21012803+4555377 и AS 357. Показано, что в их спектрах присутствуют как линии поглощения, характерные для красных гигантов поздних спектральных классов, так и линии излучения ионов с высокими потенциалами ионизации, характерные для планетарных туманностей. По ИК-критерию классификации симбиотических звезд CSS 1102, V520 And и AS 357 относятся к S-типу симбиотических звезд, 2MASS J21012803+4555377 имеет пылевую оболочку и относится к D-типу. Также у CSS 1102, V520 And был впервые открыт фликкер-эффект, определена амплитуда переменности.

При аппроксимации спектра моделью были получены параметры систем. У CSS 1102 холодный компонент является S-звездой спектрального класса S4.5/2, туманность имеет электронную температуру $T_e = 10000$ К, горячий компонент имеет эффективную температуру $40000 < T_{eff} < 55000$ К, в системе присутствует аккреционный диск с $L < 450 L_\odot$. V520 And состоит из красного гиганта спектрального класса M6, туманности с $T_e = 10000$ К, горячего компонента с $T_{eff} \sim 50000$ К и аккреционного диска с $L < 10 L_\odot$. Состав системы 2MASS J21012803+4555377 следующий: красный гигант спектрального класса M5, туманность с $T_e = 15000$ К и горячий компонент с $T_{eff} > 100000$ К. У AS 357 холодный компонент — красный гигант спектрального класса M3, туманность с $T_e = 10000$ К, горячий компонент с $T_{eff} \sim 55000$ К, в системе присутствует дополнительный компонент, спектральное распределение которого можно описать спектром звезды O8 III, который, возможно, является аккреционным диском или псевдофотосферой горячего компонента.

У V520 And наблюдается двугорбый профиль линии $H\alpha$, который описывается линией излучения с профилем Фойгта и линией поглощения с профилем

Гаусса. Вероятно, такая форма профиля $H\alpha$ говорит о поглощении излучения веществом ветра холодного компонента или газовых потоков в системе. Из спектрального мониторинга V520 And получены амплитуды фликкер-эффекта в линиях: в линиях $H\alpha$ и $H\beta$ амплитуда составила 8 – 10%, в линии He I λ 5876 — \sim 30 %. Временных задержек зарегистрировано не было.

В **Заключении** приведены основные выводы и результаты работы. Отмечено, что программа управления малыми телескопами позволяет достичь на них предельной фотометрической точности для наземного телескопа с диаметром зеркала 60 см — 0.001 mag. Также в Заключении подчеркивается важность учета эффекта красной утечки при наблюдениях фликкер-эффекта у симбиотических звезд. Обобщено, что из наблюдаемых нами 34 симбиотических звезд и 12 кандидатов только у 6 систем была зарегистрирована быстрая переменность блеска: T CrB, CH Cyg, SU Lyn и впервые у CSS 1102, DQ Ser и V520 And. Отмечено, что в работе была подтверждена симбиотическая природа 4 объектов: CSS 1102, V520 And, 2MASS J21012803+4555377 и AS 357. В Заключении приведены основные параметры фликкер-эффекта, полученные при спектральных мониторингах для T CrB и Y Gem.

Публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. **Масленникова, Н.А.**, Татарникова, А.А., Татарников, А.М., Иконникова, Н.П., Додин, А.В. Симбиотическая природа циркониевой звезды CSS1102 // Письма в Астрономический журнал. — 2022. — Т. 48, № 1. — С. 43-51. EDN: RQMHP1. Импакт-фактор 0.193 (РИНЦ). Личный вклад 75%. Объем 1.08 печатных листов.

Maslennikova, N.A., Tatarnikova, A.A., Tatarnikov, A.M., Ikonnikova, N.P, Dodin, A.V. Symbiotic nature of the zirconium star CSS 1102 // Astronomy Letters. — 2022. — Vol. 48, № 1. — P. 38-46. EDN: OBLIMZ. Импакт-фактор 0.20 (JCI). Личный вклад 75%. Объем 1.08 печатных листов.

2. **Масленникова, Н.А.**, Татарников, А.М., Татарникова, А.А. Исследование спектральной быстрой переменности Т Северной Короны // Астрофизический бюллетень. — 2023. — Т. 78, № 3. — С. 338-346. EDN: YDDNWR. Импакт-фактор 0.484 (РИНЦ). Личный вклад 75%. Объем 0.96 печатных листов.
Maslennikova, N.A., Tatarnikov, A.M., Tatarnikova, A.A. Rapid spectral variability of T Corona Borealis // Astrophysical Bulletin. — 2023. — Vol. 78, № 3. — P. 325-332. EDN: SOJLPW. Импакт-фактор 0.31 (JCI). Личный вклад 75%. Объем 0.96 печатных листов.
3. **Масленникова, Н.А.**, Татарников, А.М., Татарникова, А.А., Додин, А.В., Шенаврин, В.И., Бурлак, М.А., Желтоухов, С.Г., Страхов, И.А. Повторная симбиотическая новая Т Северной Короны перед вспышкой // Письма в Астрономический журнал. — 2023. — Т. 49, № 9. — С. 589-604. EDN: OHGYIV. Импакт-фактор 0.193 (РИНЦ). Личный вклад 50%. Объем 1.92 печатных листов.
Maslennikova, N.A., Tatarnikov, A.M., Tatarnikova, A.A., Dodin, A.V., Shenavrin, V.I., Burlak, M.A., Zheltoukhov, S.G., Strakhov, I.A. Recurrent symbiotic nova T Coronae Borealis before outburst // Astronomy Letters. — 2023. — Vol. 49, № 9. — P. 501-515. EDN: NHZITU. Импакт-фактор 0.20 (JCI). Личный вклад 50%. Объем 1.92 печатных листов.
4. Никишев, Г.Э., **Масленникова, Н.А.**, Татарников, А.М., Парусов, К.Ю., Белинский, А.А. О влиянии красной утечки светофильтров на оценки блеска звезд поздних спектральных классов на примере наблюдений быстрой переменности симбиотических звезд // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2023. — Т. 78, № 6. — 2360801. EDN: LENQHC. Импакт-фактор 0.169 (РИНЦ). Личный вклад 40%. Объем 0.96 печатных листов.
Nikishev, G.E., **Maslennikova, N.A.**, Tatarnikov, A.M., Parusov, K.Yu., Belinski, A.A. On the influence of “red leak” of light filters on the brightness estimates of stars of late spectral types illustrated by the observations of rapid variability of symbiotic stars // Moscow University Physics Bulletin. — 2023. — Vol. 78, № 6. — P. 854-862. EDN: QRSNTU. Импакт-фактор 0.11 (JCI). Личный вклад 40%. Объем 1.08 печатных листов
5. **Масленникова, Н.А.**, Татарников, А.М., Татарникова, А.А., Додин, А.В., Шатский, Н.И. Исследование девяти кандидатов в симбио-

- тические звезды. Открытие симбиотической природы V520 And // *Астрофизический бюллетень*. — 2025. — Т. 80, № 1. — С. 60-71. EDN: ARTCQJ. Импакт-фактор 0.484 (РИНЦ). Личный вклад 50%. Объем 1.32 печатных листов.
- Maslennikova, N.A.**, Tatarnikov, A.M., Tatarnikova, A.A., Dodin, A.V., Shatsky, N.I. Study of Nine Symbiotic Star Candidates. Discovery of the Symbiotic Nature of V520 And // *Astrophysical Bulletin*. — 2025. — Vol. 80, № 1. — P. 58-68. EDN: HLZSXV. Импакт-фактор 0.31 (JCI). Личный вклад 50%. Объем 1.32 печатных листов.
6. Tatarnikova, A.A., Tatarnikov, A.M., **Maslennikova, N.A.**, Dodin, A.V., Burlak, M.A., Ikonnikova, N.P., Belinski, A.A., Nikishev, G.E. A new activity cycle of V1413 Aql // *Galaxies*. — 2025. — Vol. 13, № 4. — 86. EDN: PKQOLR. Импакт-фактор 0.68 (JCI). Личный вклад 20%. Объем 1.56 печатных листов.
7. Татарников, А.М., Татарникова, А.А., **Масленникова, Н.А.**, Додин, А.В., Бурлак, М.А., Татарников, А.А. Открытие новой симбиотической звезды 2MASS J21012803+4555377 // *Астрофизический бюллетень*. — 2025. — Т. 80, № 4. — С. 642-647. EDN: OLNTRQ. Импакт-фактор 0.484 (РИНЦ). Личный вклад 20%. Объем 0.72 печатных листов.
- Tatarnikov, A.M., Tatarnikova, A.A., **Maslennikova, N.A.**, Dodin, A.V., Burlak, M.A., Tatarnikov, A.A. Evidence for the symbiotic nature of 2MASS J21012803+4555377 // *Astrophysical Bulletin*. — 2025. — Vol. 80, № 4. — P. 620-625. EDN: RHNGYB. Импакт-фактор 0.31 (JCI). Личный вклад 20%. Объем 0.72 печатных листов.

Глава 1. Автоматизация телескопов

Глава основана на работе 4 из списка публикаций по теме диссертации.

В настоящее время в астрономии для фотометрических наблюдений большого числа объектов: от тел Солнечной системы и экзопланет до активных ядер галактик, активно применяются малые телескопы с диаметром зеркала 50-60 см. На обсерваториях ГАИШ МГУ установлено 4 таких инструмента: два телескопа Цейсс-600 на Крымской астрономической станции (КАС) и два RC600, один из которых установлен на КАС, другой — в Кавказской горной обсерватории (КГО).

На обсерватории КАС ГАИШ МГУ телескопу Цейсс-600, на котором мы проводили наблюдения, присвоен второй номер — Цейсс-2. Он был установлен в 1982 г. Диаметр зеркала составляет 600 мм, фокусное расстояние — 7500 мм. Телескоп является классическим рефлектором Кассегрена, установлен на немецкой экваториальной монтировке. Изначально он имел ручное наведение. С 2022 г. началась его поэтапная автоматизация.

Рисунок 1.1 демонстрирует блок-схему модернизированной системы управления телескопом Цейсс-2. Ключевыми элементами являются: распределённая система управления наблюдениями (три компьютера), двигатели с контроллерами (отвечающие за быстрое движение по часовому углу с узлом тормоза, часовое и медленное движение по часовому углу, быстрое и медленное движение по склонению, а также фокусировку), установленные на монтировке и трубе телескопа, научная ПЗС-камера и отдельная подсистема управления куполом.

Для передачи команд и данных между управляющим компьютером (установленным на колонне монтировки) и остальными узлами был выбран интерфейс RS-485. Эта помехо-защищенный канал обмена позволяет передавать информацию по проводам, проложенным в том числе рядом с силовыми кабелями. К тому же компьютеру через отдельные линии связи подключены два энкодера — по оси склонения и полярной оси. В роли управляющего компьютера выступает микрокомпьютер Radxa Pi4 (в первой версии использовался популярный Raspberry 3), на котором выполняются программы управления нижнего уровня. Центральный управляющий узел — это компьютер с сервером EPICS (программная платформа для построения модульных распределенных систем сбора данных и управления, пришедшая из ядерной физики). На нем с 2019 года

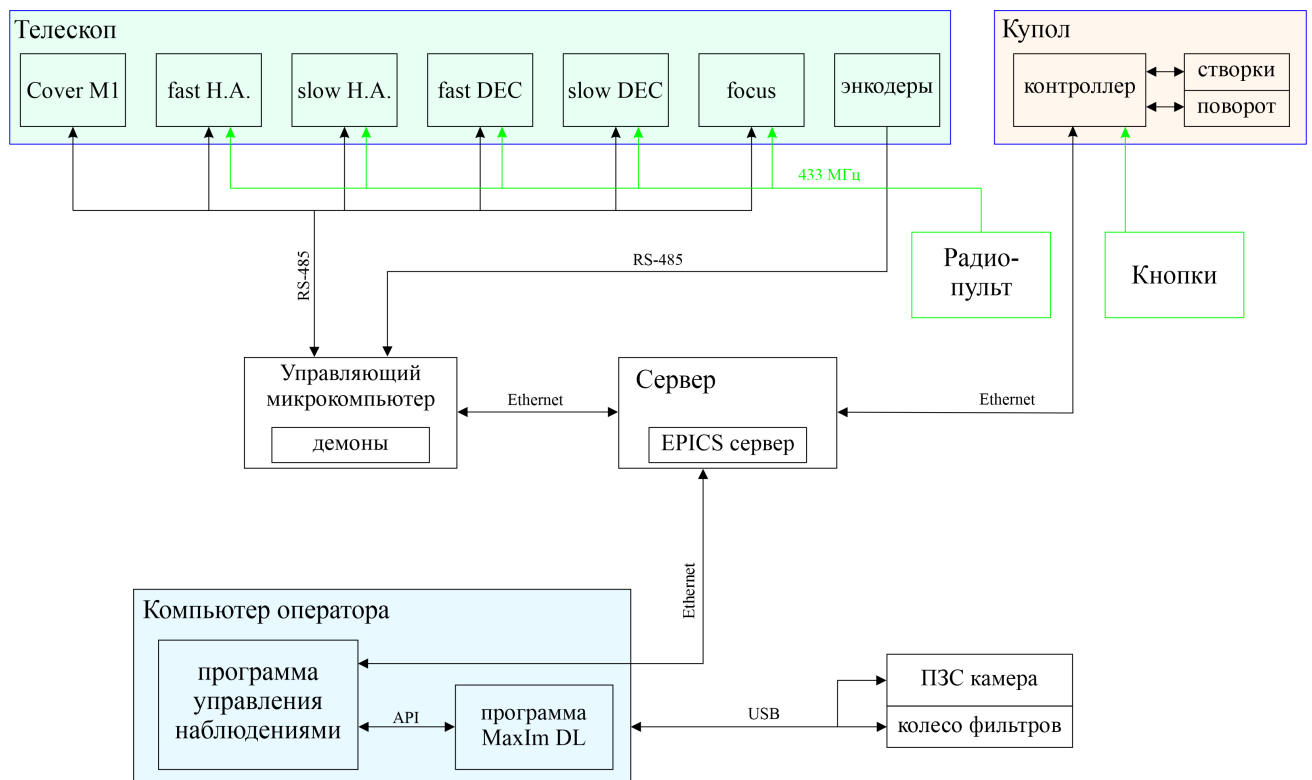


Рисунок 1.1 — Общая схема системы управления Цейсс-2.

работает система управления 2.5-метровым телескопом КГО ГАИШ. EPICS-сервер обеспечивает сетевой доступ к набору так называемых PV-переменных; изменение этих переменных служит для отправки команд и обмена данными.

Телескопы RC600 в КГО [25] и КАС ГАИШ МГУ — близнецы. Диаметр зеркал составляет 600 мм, фокусные расстояния — 4200 мм. Телескопы имеют оптическую схему Ричи-Кретьена, установлены на автоматической немецкой экваториальной монтировке с абсолютными энкодерами. Телескопы RC600 управляются через ASCOM-драйвер.

Купола телескопов могут управляться как через EPICS-переменные, так и через ASCOM-драйвер.

Наблюдения, проводимые в ручном режиме, тратят намного больше времени на наведения на объект, чем автоматические наблюдения. Также из-за отсутствия автогидирования точность фотометрии на «ручных» телескопах относительно невысока — звезды в ходе длительного мониторинга перемещаются по кадру, из-за чего все ошибки плоского поля входят в ошибки фотометрии. Таким образом, автоматизация телескопов позволяет повысить эффективность наблюдений и увеличить точность фотометрии, что очень важно для исследования малоамплитудных эффектов, таких как, например, фликкер-эффект у симбиотических звезд или транзиты экзопланет.

1.1 Программа управления телескопами

Для простоты использования программы управления телескопами (которую мы назвали Crimean Astronomical Telescope Software — CATS) Цейсс-2 (и Цейсс-1 — в работе), RC600 КГО и RC600 КАС были сделаны похожим образом.

Поскольку для работы с камерой и колесом фильтров используется программа MaxIm DL (версии 5.09 и 6), которая работает исключительно под Windows, то и управляющая программа CATS, запускающаяся на том же компьютере, расположенном непосредственно в башне телескопа, была разработана под эту операционную систему. CATS написана на Python 3 и взаимодействует с MaxIm DL через библиотеку win32com, что позволяет использовать MaxIm DL как универсальный «драйвер»: он управляет оборудованием (камерой и колесом фильтров) и одновременно служит средством просмотра получаемых изображений.

Было реализовано три режима наблюдений:

1. с оператором, находящимся в башне;
2. с удаленным оператором, когда он подключается к компьютеру через RDP-соединение;
3. полностью автоматические наблюдения.

С точки зрения программы CATS, первые два режима не различаются. Для удобства управления был разработан графический интерфейс (GUI) (рис. 1.2), который отображает текущее состояние системы даже во время автоматических наблюдений — это позволяет человеку контролировать процесс.

Вверху окна отображаются основные параметры телескопа и купола: координаты, на которые наведен телескоп (RA — прямое восхождение, Hour angle — часовой угол, DEC — склонение, Alt — высота, Az — азимут), перекладка (Side), оставшееся возможное время ведения в данной перекладке данных координат (Max track time), состояние купола и затвора и состояние крышек зеркала.

Наблюдения оператором и в полностью автоматическом режиме происходят очень похоже, поэтому более подробно рассмотрим стандартные наблюдения в режиме наблюдений оператором. Наблюдения начинаются с открытия купола и крышки зеркала телескопа (кнопки Open Dome и Open Cover). Включается часовое ведение (кнопка Track). Купол синхронизируется с положением трубы телескопа. Для наведения на объект оператор должен задать экватори-

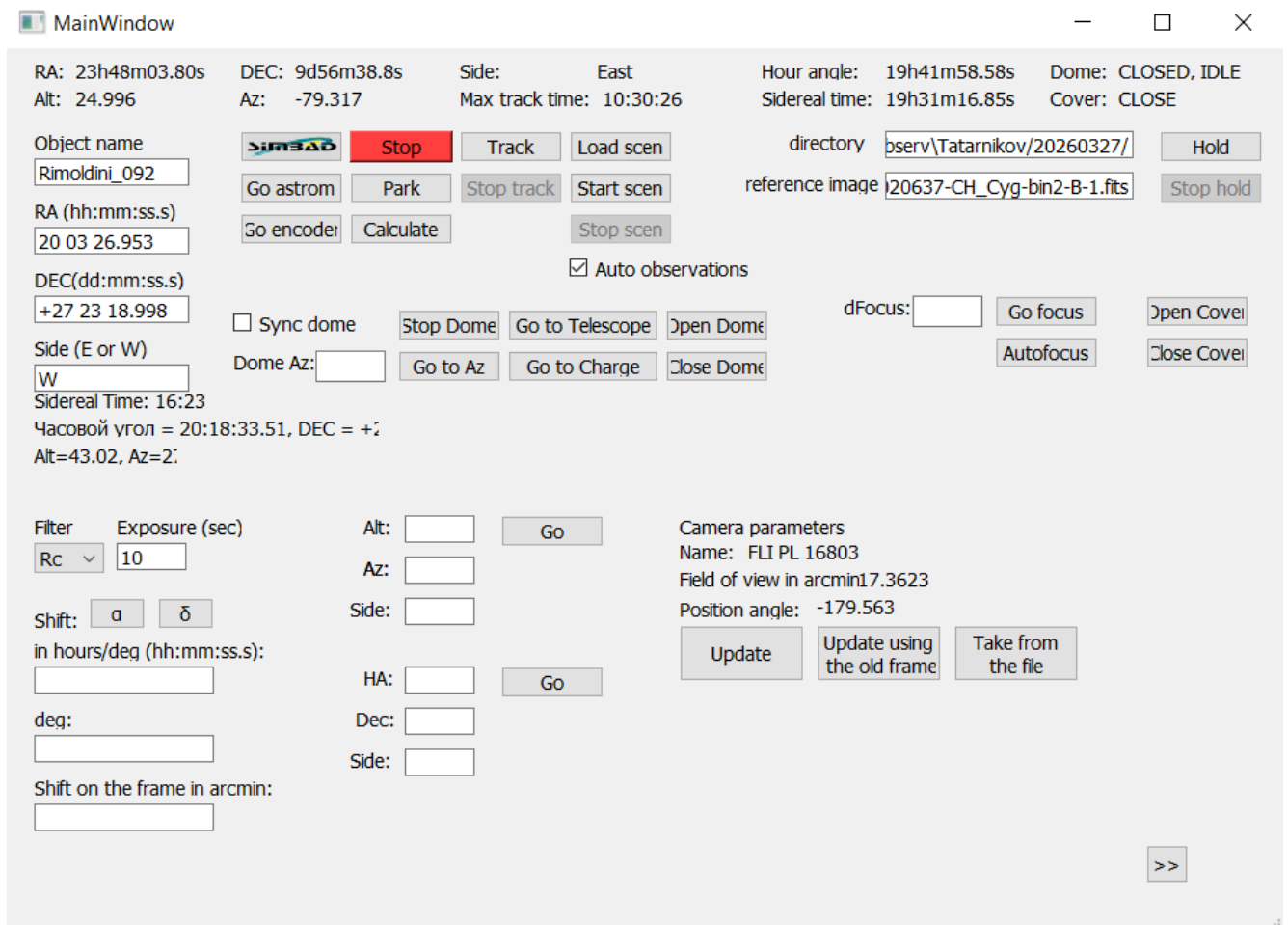


Рисунок 1.2 — Окно программы управления телескопом.

альные координаты объекта или имя объекта, чтобы координаты загрузились из базы данных Simbad. Также можно указать желаемую перекладку (в противном случае наведение будет выполнено в восточной перекладке, и только если это невозможно, будет выбрана западная перекладка). Телескоп наводится на объект в два этапа. Сначала он наводится на указанные координаты, используя данные с энкодеров о своем начальном положении. После этого получается изображение, обычно в полосе Rc с экспозицией 10 с, данные настройки можно поменять в полях Filter и Exposure. По кадру с помощью программного пакета *astrometry.net* [26] на Цейссе-2 и с помощью АСТАР на RC600 определяются координаты центра поля зрения, и телескоп доводится так, чтобы объект попал в центр поля.

Фокусировка может быть как ручной — оператор вручную двигает вторичное зеркало и оценивает резкость изображения, так и автоматической, с использованием встроенного алгоритма CATS. При автофокусировке система делает 11 снимков с шагом 0.1 мм в диапазоне ± 0.5 мм от текущего положения зеркала (этого достаточно, поскольку изменения положения вторичного зеркала

ла из-за изменений температуры обычно не превышают нескольких десятых миллиметра). На каждом кадре с помощью библиотеки photutils [27] выбирается яркая, но не пересвеченная звезда, и измеряется FWHM её профиля. Затем строится зависимость FWHM от положения фокуса, аппроксимируемая параболой — её минимум и дает оптимальную фокусировку.

Для более гибкого управления телескопом и куполом в графическом интерфейсе предусмотрен ряд дополнительных возможностей. Для обслуживания купола оператор может направить его на произвольный азимут, развернуть так, чтобы щель оказалась напротив трубы телескопа, либо отправить в парковочное положение. Помимо стандартного наведения по экваториальным координатам, программа поддерживает наведение по горизонтальным — это бывает полезно, например, при съемке калибровочных кадров или при проведении нестандартных наблюдений. В этом случае введенные горизонтальные координаты автоматически пересчитываются в экваториальные, и уже по ним выполняется наведение. Кроме того, реализована возможность точечной коррекции положения трубы: оператор может задать смещение либо в виде изменения экваториальных координат центра поля зрения, либо как сдвиг центра поля зрения по небу.

Для увеличения точности относительной фотометрии во время длительных мониторингов, необходимо удерживать звезды на одних и тех же пикселях на кадре. Это позволяет снизить требования к качеству кадров «плоского поля». Точности часового ведения телескопа для этого недостаточно, поэтому положение телескопа корректируется по полученным кадрам. Более подробно это описано в разделе 1.2.

При завершении наблюдений останавливается часовое ведение телескопа, и закрывается крышка зеркала. Если погода хорошая, то купол едет в парковочное положение для зарядки, затем закрывается. Время парковки может превышать 2 минуты, поэтому, если погода плохая, купол сразу начинает закрываться и одновременно едет на парковочное место.

Управление съемкой кадров происходит в отдельном окне GUI (рис. 1.3).

Для ручной фокусировки или предварительной оценки оператором необходимого времени экспозиции в CATS предусмотрена возможность делать тестовые снимки, которые не сохраняются. Рабочие кадры получаются согласно сценарию, заранее заданному оператором: в нем указываются параметры съемки — фильтр, время накопления,

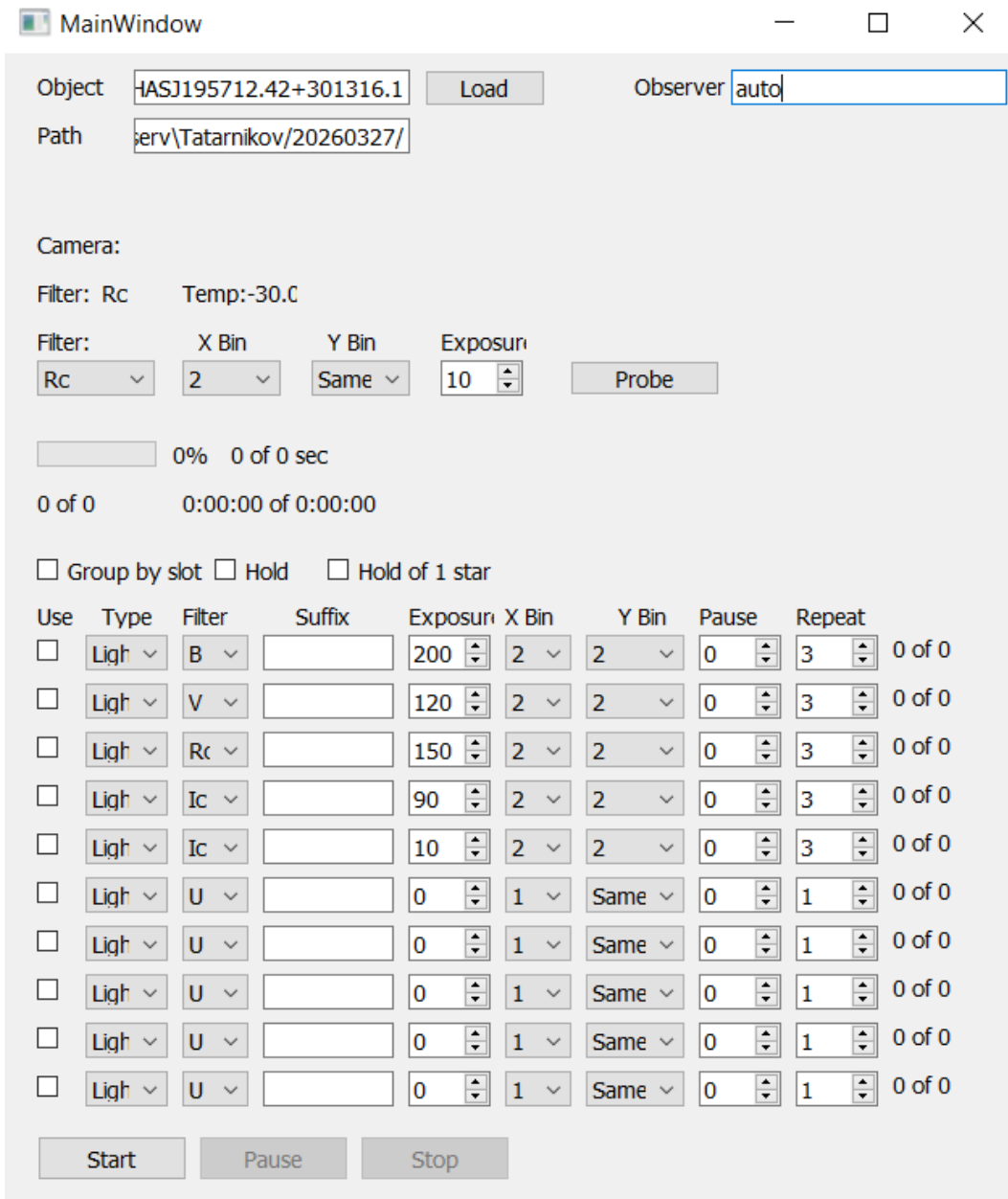


Рисунок 1.3 — Окно программы управления камерой.

количество кадров, бинирование и длительность пауз между экспозициями. Полученные снимки автоматически сохраняются с именами вида YYYYMMDDTННМSS-<Object_name>-бинирование-фильтр-номер кадра в серии (например, 20241224T050116-StHA63-bin2-Ic1.fits). Такой формат гарантирует уникальность имен файлов и одновременно делает их понятными для человека. С помощью соответствующих опций в этом же окне можно выбирать порядок съемки: либо группировать кадры по фильтрам, либо чередовать фильтры между собой.

Автоматический режим отличается от описанного лишь источником входных данных: имя объекта, координаты центра поля, фильтр, бинирова-

ние, экспозиция и число кадров поступают не от оператора, а из внешнего источника — в текущей реализации это обычный текстовый файл. Программа подставляет полученные параметры в соответствующие поля интерфейса (чтобы оператор при желании мог визуально следить за процессом), затем «нажимает» кнопку наведения, а после его успешного завершения — кнопку начала съемки. После того как все запланированные кадры получены, программа переходит к следующему объекту в списке.

Если заранее определить нужное время экспозиции невозможно, соответствующее поле в задании можно оставить пустым — в этом случае программа сама подберет подходящее значение. Это делается следующим образом. После наведения получают пробные кадры в полосах B и Rc с экспозицией 10 с (это минимальная возможная экспозиция на Цейссе-2, при которой возможна высокоточная фотометрия из-за ограничений по времени срабатывания ирисового затвора) и бинированием 2, оценивается уровень сигнала объекта. Если сигнал от объекта при такой экспозиции слишком мал в данной полосе, то делается кадр с экспозицией 30 с и оценивается сигнал по данному кадру. Если же за 10 с сигнал от объекта настолько большой, что объект оказывается на участке нелинейности ПЗС-камеры, то снимается кадр с бинированием 1. Если этого недостаточно, то телескоп немного расфокусируется и получает еще один пробный кадр. Всего предусмотрено изменение фокуса на 0.5 мм от сфокусированного положения. При таком положении фокуса сигнал от наиболее ярких звезд, наблюдаемых на 60-см телескопе (≈ 6 mag), оказывается на линейном участке чувствительности ПЗС. В итоге после получения пробных кадров у нас есть оценки сигнала звезды в полосах B и Rc , которые пересчитываются к сигналу за 1 секунду при бинировании 1 при сфокусированном изображении. Для оценки сигнала от звезды в остальных фотометрических полосах была проведена синтетическая фотометрия: спектры звезд различных спектральных классов из библиотеки [28] были свернуты с кривыми пропускания фильтров и квантовой эффективностью камеры, посчитаны их наблюдаемые звездные величины в различных фильтрах. Затем были построены зависимости звездной величины в каждом фильтре от отношения потоков в B и Rc . Используя эти зависимости и полученные из наблюдений пробных кадров сигнал в полосах B и Rc , можно посчитать сигнал в любой полосе за 1 секунду при бинировании 1 при сфокусированном изображении, а уже из этой величины подбирается нужная экспозиция и нужные параметры съемки для получения заданной точности.

Если наблюдения нужны только в одной или двух полосах, то пробные кадры получаются в нужных полосах, после этого сразу рассчитываются экспозиции и параметры съемки.

По показаниям с метеостанции программа сначала оценивает, можно ли безопасно начинать наблюдения. Если условия подходят, она открывает купол и запускает наблюдения. При этом учитываются скорость ветра (она должна быть меньше 10 м/с), положение Солнца относительно горизонта (глубина погружения под горизонт должна превышать -12° , для плоских полей Солнце должно быть ниже -4°), облачность (отсутствие сплошной облачности), влажность (в теплый сезон — ниже 96%, в холодный — ниже 93%) и наличие дождя. Наблюдения могут быть остановлены либо когда метеопараметры выходят за заданные границы, либо когда наступают утренние сумерки, либо при возникновении нештатной ситуации: программа закрывает купол и переводит телескоп и купол в парковочное положение.

1.2 Удержание звезд на кадре

Многие научные задачи, такие как изучение транзита экзопланет, катаклизмических переменных или фликкер-эффекта симбиотических звезд, требуют фотометрических мониторингов — наблюдений, при которых один и тот же участок неба снимается в течение нескольких часов с короткими экспозициями. При этом требуется относительная фотометрическая точность около 0.001 mag, что примерно соответствует предельной точности наземного телескопа с диаметром зеркала 60-см [29]. Из-за различных изгибов трубы телескопа и неточного ведения изображение звезды перемещается по кадру во время наблюдений. Поскольку при попиксельной коррекции с помощью плоского поля неизбежно возникают ошибки, движение звезды по разным пикселям приводит к систематическим ошибкам (при анализе кривых блеска неотличимых от случайных) и ухудшению фотометрической точности. Таким образом, для достижения точности в тысячные доли звездной величины требуется субпиксельная точность часового ведения.

Телескопы RC600 и Цейсс-2 не имеют в своей конструкции специального гидировочного устройства. Следовательно, для реализации высокоточного

механизма компенсации суточного вращения необходимо использовать данные о смещении звезд, извлеченные из только что полученных научных кадров. Сравнение положения звезд на этих кадрах с опорным кадром (например, с первым кадром в серии) позволяет рассчитать требуемое смещение. Поскольку наблюдения часто проводятся с расфокусированным телескопом для повышения точности фотометрии и при наблюдении за яркими источниками (это увеличивает суммарную емкость ячеек детектора), для определения смещений звезд между кадрами был выбран пакет DONUTS [30].

Рассмотрим принцип работы DONUTS более подробно. Сначала он проецирует опорное изображение на оси x и y :

$$\begin{aligned} Image &= I(x,y) \\ X_{ref} &= \left(x, \sum_y I(x,y) \right) \\ Y_{ref} &= \left(y, \sum_x I(x,y) \right) \end{aligned} \tag{1.1}$$

Программа сохраняет полученные массивы X_{ref} и Y_{ref} . При получении нового кадра изображение проецируется аналогичным образом с использованием формул 1.1, в результате чего получаются массивы X_{comp} и Y_{comp} . Затем, используя быстрое преобразование Фурье, вычисляются корреляции между X_{ref} и X_{comp} , а также между Y_{ref} и Y_{comp} . После этого координаты телескопа исправляются с учетом вычисленных смещений. Поскольку для определения смещений не используется определение центра изображения звезды, DONUTS может точно определять смещения кадра даже при сильной расфокусировке телескопа.

В применении DONUTS на Цейсс-2 существует несколько особенностей. При использовании DONUTS предполагается, что основной сигнал вносят звезды, а не горячие пиксели. Это условие не всегда выполняется для камеры FLI 16803, установленной на Цейсс-2. Летом из-за высокой температуры окружающей среды детектор работает при температуре -15°C . При этом на изображениях появляется большое количество горячих пикселей, которые остаются неподвижными от кадра к кадру. В этом случае их сигнал может преобладать над сигналами звезд при проецировании. Проблема еще больше усугубляется при мониторинговых наблюдениях в полосах пропускания со

слабыми звездными сигналами, таких как U или узкополосные фильтры, например, [O III].

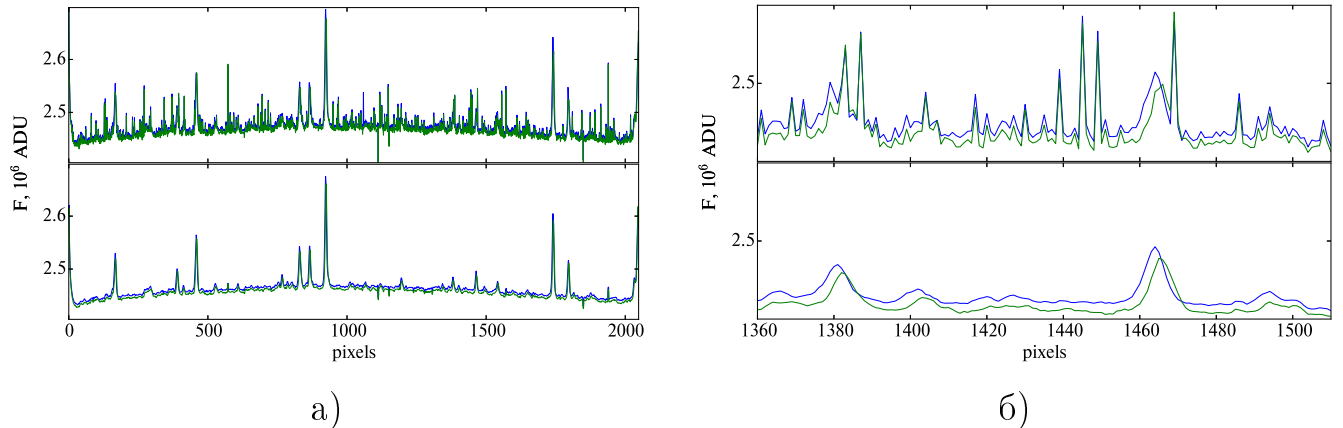


Рисунок 1.4 — Проекция изображения CSS 1102 на ось X (а) и увеличенный участок этой проекции (б). Синяя линия обозначает опорное изображение, зеленая — изображение, для которого считаются поправки. На верхних графиках показаны проекции полученные по сырым кадрам, на нижнем — по кадрам, к которым применен медианный фильтр.

Рассмотрим принцип работы DONUTS на примере нескольких кадров симбиотической звезды CSS 1102, полученных 21 июля 2025 года в полосе B . Время экспозиции кадра составило 200 секунд. Верхние графики на рис. 1.4 показывают, что изображения слегка смещены относительно друг друга, но звезды едва различимы на фоне шума. DONUTS обнаружит корреляцию между горячими пикселями, которые не перемещаются по кадру (они хорошо видны на рис. 1.4б), и, таким образом, положение телескопа исправляться не будет. Чтобы устранить эту проблему, перед обработкой с помощью DONUTS к кадрам был применен медианный фильтр. При этом удаляются почти все горячие пиксели, что делает звезды отчетливо видимыми. Пример проекции изображения по оси X после медианной фильтрации показан на нижних графиках рис. 1.4.

Еще одной проблемой DONUTS является его неэффективность в бедных звездных полях, где фоновые звезды практически отсутствуют. Чаще всего это происходит при наблюдении за очень яркими звездами, где нельзя использовать длительную экспозицию из-за риска перекопления сигнала от объекта. Например, в таком поле находится хорошо известная симбиотическая повторная новая Т CrB. В этом случае, даже после применения медианного фильтра, DONUTS не всегда работает корректно. Для таких объектов мы реализовали механизм ведения по одной звезде: вокруг достаточно яркой звезды выбирается квадрат

размером 80×80 пикселей, затем применяется медианный фильтр, и, наконец, изображение обрабатывается программой DONUTS.

При хороших погодных условиях и нормальной работе телескопа межкадровые поправки обычно остаются на уровне менее 5 пикселей (обычно < 2 пикселей). Однако во время мониторинга в поле зрения телескопа может попасть кратковременная облачность. В таких случаях звездный поток значительно уменьшается. Если DONUTS обработает такой кадр, он все равно обнаружит корреляцию между шумом и опорным кадром, но результирующие смещения могут достигать очень больших значений (например, 200-500 пикселей). Без мер предосторожности телескоп может вывести объект за пределы поля зрения всего за два-три цикла коррекции. Поэтому мы ограничили величину коррекций — она не должна превышать 50 пикселей.

Поправки, полученные с помощью DONUTS, преобразуются в градусы и передаются в контроллеры шаговых двигателей. Привод оси склонения смещается на заданный угол. Привод прямого восхождения добавляет или пропускает необходимое количество шагов (один шаг равен 0.2 угловой секунды) непосредственно во время ведения телескопа, что позволяет перемещать телескоп без люфта.

На рис. 1.5 показаны примеры величины коррекций в ходе мониторингов пяти объектов. В целом, поправки остаются неизменными при стандартном отклонении ≈ 0.5 пикс. Однако во время наблюдений в определенных областях неба наблюдается постепенный сдвиг поправок (см. фиолетовые точки на рис. 1.5), что может быть вызвано плохой балансировкой монтировки и пересечением меридиана во время наблюдений.

Таким образом, была реализована программа управления телескопами Цейсс-2 и RC600, которая позволила проводить наблюдения в автоматизированном режиме. Алгоритм удержания объектов на одних и тех же пикселях во время мониторинговых наблюдений в течение нескольких часов позволяет достичь предельной фотометрической точности для наземных телескопов — ~ 0.001 mag.

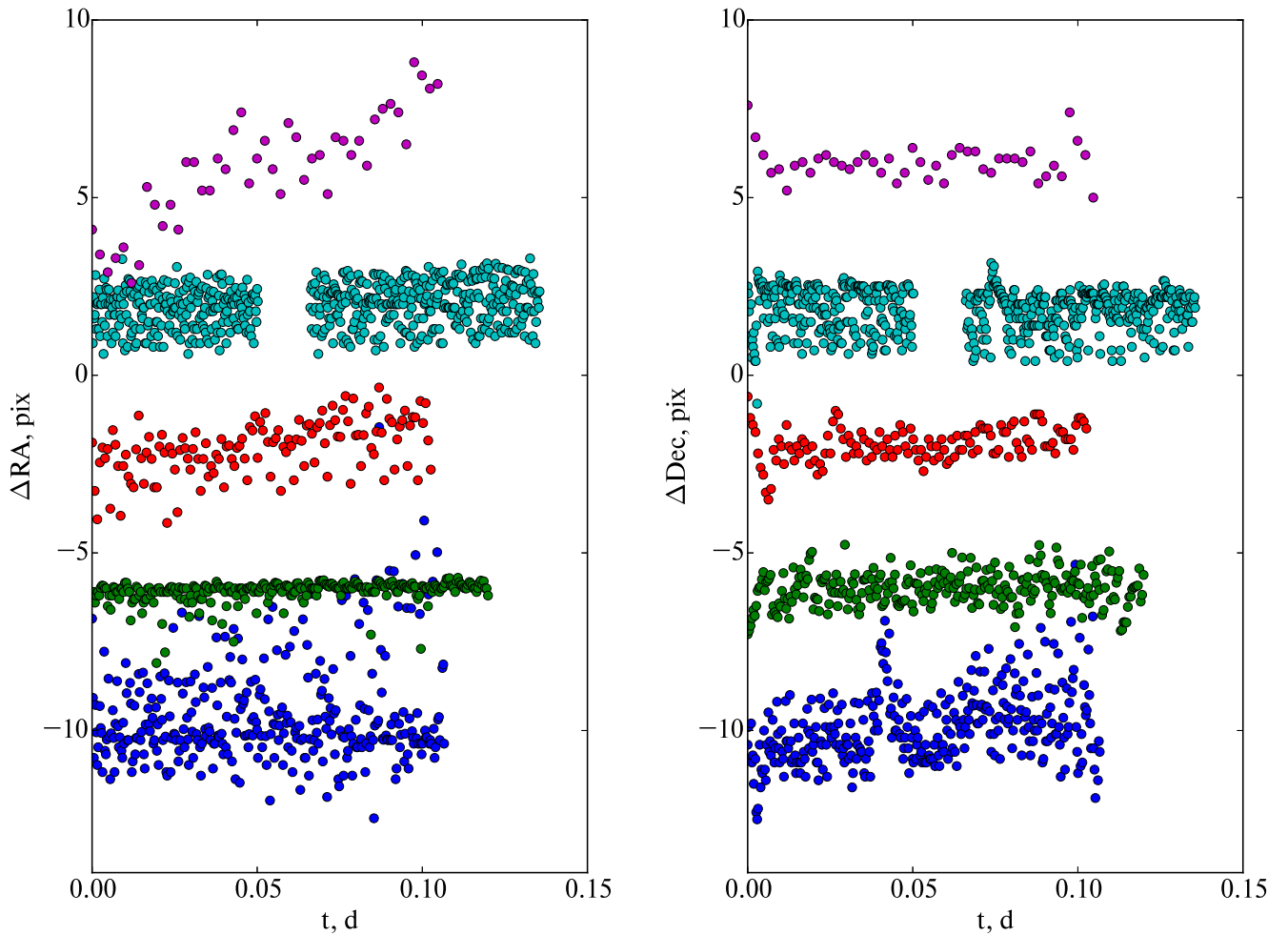


Рисунок 1.5 — Коррекции по прямому восхождению (левый рисунок) и склонению (правый рисунок) в течение мониторингов. По оси абсцисс отложено время в днях. Точки разного цвета обозначают наблюдения разных объектов; для наглядности графики сдвинуты на произвольную константу.

1.3 Красная утечка

Современный поиск и исследование быстрой переменности симбиотических звезд проводятся методами ПЗС-фотометрии. Поскольку холодный красный гигант излучает преимущественно в красной и ближней инфракрасной областях спектра и его яркость на характерных временах мониторинга (сотни минут) можно считать постоянной, оптимальными для поиска фликкер-эффекта считаются синие полосы, такие как U или B . В этих полосах относительный вклад аккреционного диска выше, так как излучение гиганта резко ослабевает с уменьшением длины волны.

Однако существует важная проблема связанная с неидеальностью кривых пропускания полос. Современные ПЗС-детекторы обладают чрезвычайно широким диапазоном чувствительности — от 300–350 нм до 1100–1200 нм. Поэтому, если используемый коротковолновый светофильтр обладает пропусканием в красной области (так называемой «красной утечкой», red leak), в измеряемый сигнал будет поступать не только нужное коротковолновое излучение, но и паразитная доля длинноволновых фотонов от холодного компонента. При наблюдениях чрезвычайно красных объектов, таких как поздние М-гиганты, этот эффект может приводить к существенным систематическим ошибкам в фотометрии даже при номинально малом (около доли процента) уровне утечки. С этой проблемой сталкивались, в частности, при использовании УФ-фильтров космического телескопа «Хаббл» и фильтра u в обзоре SDSS. Вопрос учета красной утечки актуален и для фотометрии симбиотических звезд [31].

Для изучения фликкер-эффекта у симбиотических звезд учет красной утечки очень важен, так как даже небольшой вклад дополнительного излучения уменьшает и так небольшую амплитуду быстрой переменности. Поэтому нами была разработана методика коррекции красной утечки фильтров при наблюдении симбиотических звезд в полосах U , B на ПЗС-фотометре RC600 КГО.

У используемых на RC600 до 2023 г. фильтров U и B есть существенная красная утечка (кривые пропускания приведены на рис. 1.6). Фильтр U демонстрирует узкий пик дополнительного пропускания на длине волны 700 нм. У фильтра B утечка состоит из двух компонент: красной (в диапазоне 550–700 нм со средним пропусканием <0.1 %) и обширной инфракрасной со средним пропусканием около 1 %.

Кроме характеристик самих фильтров, на итоговый уровень паразитного сигнала влияют пропускание земной атмосферы, оптические элементы камеры и спектральная чувствительность ПЗС-приемника. Для количественной оценки суммарного эффекта этих факторов была проведена синтетическая фотометрия. Спектры звезд различных спектральных классов (от O5 до M10) из библиотеки [28] сворачивались с кривыми пропускания, считалась красная утечка и строились зависимости величины красной утечки от показателя цвета ($V-R$) (рис. 1.7). Было показано, что величина красной утечки зависит от класса светимости объекта, межзвездного покраснения и воздушной массы, а содержание воды в атмосфере на нее практически не влияет.

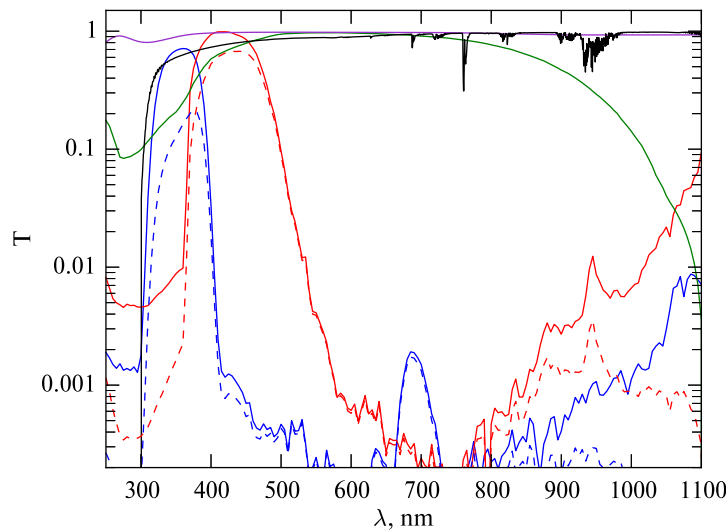
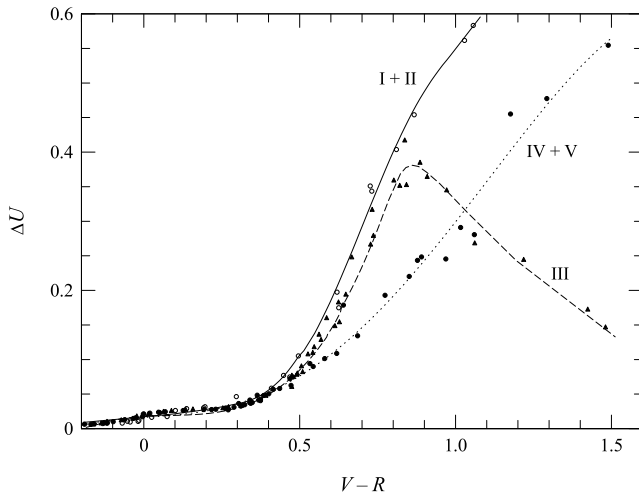


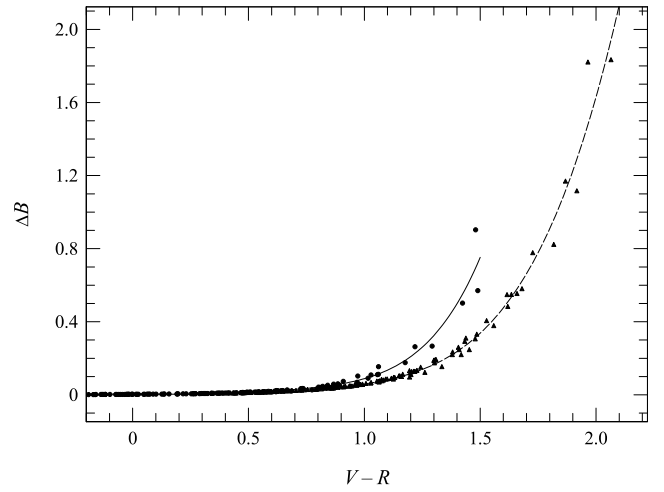
Рисунок 1.6 — Кривые пропускания фильтров U (синяя линия) и B (красная линия), атмосферы (черная линия), входного окна камеры (фиолетовая линия) и кривая чувствительности ПЗС-камеры Andor iKON-L (зеленая линия). Штриховыми линиями показаны кривые реакции соответствующих инструментальных полос (произведение пропускания фильтров, входного окна и чувствительности камеры)

Коррекция красной утечки для симбиотических звезд зависит от величины вклада горячего компонента, туманности или аккреционного диска в спектральное распределение энергии. Если спектр объекта не отличается от спектра нормальной звезды, то можно просто использовать полученные зависимости. Для иллюстрации методики коррекции в этом случае рассмотрим мониторинг симбиотической звезды SU Lyn, полученный 25.02.2023 в полосе U на телескопе RC600. Холодный компонент системы — красный гигант спектрального класса M5III, окруженный пылевой оболочкой. Из сравнения спектра SU Lyn, полученного 09.12.2022 на ТДС 2.5-м. телескопа КГО, с усредненным спектром красного гиганта из библиотеки [28] было найдено $E(B - V) = 0.64$. После коррекции спектра за межзвездное покраснение с данным $E(B - V)$ он полностью совпадает с красным гигантом, включая голубую область (рис. 1.8). То есть вклад аккреционного диска пренебрежимо мал.

В течение мониторинга, который длился 3 часа, высота звезды изменилась с 57° до 30° , из-за изменения высоты красная утечка составила от 0.77 mag до 0.94 mag. После учета красной утечки систематический тренд на кривой блеска (рис. 1.9) был устранен, что подтверждает корректность использованного метода.



а) полоса U , кружками отмечены звезды I и II классов светимости, треугольниками — III класса, точками — IV и V классов



б) полоса B , кружками отмечены звезды I–V классов светимости без межзвездного покраснения, треугольниками — при $E(B - V) = 1$.

Рисунок 1.7 — Зависимость величины красной утечки в полосах U и B от цвета для звезд разных классов светимости

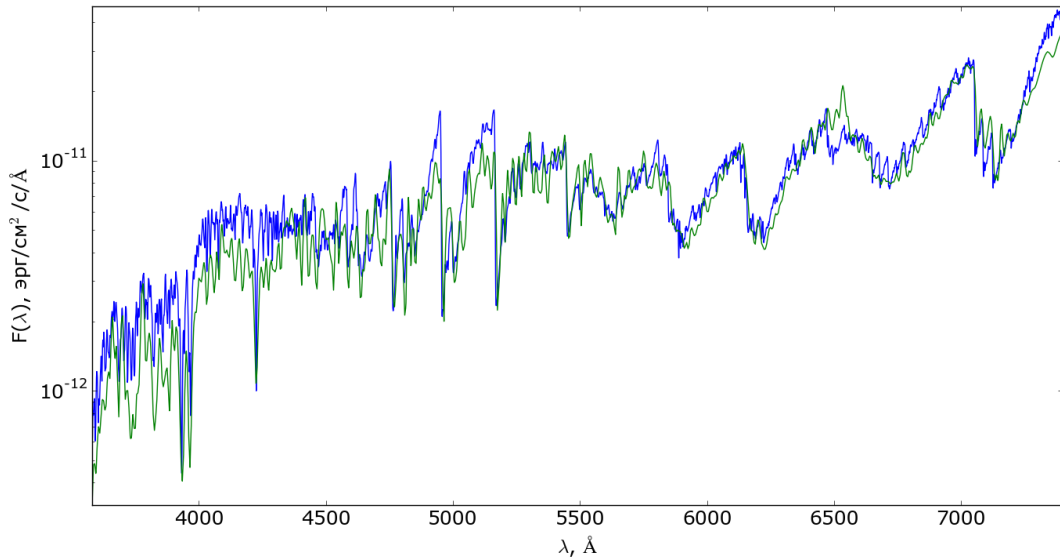


Рисунок 1.8 — Спектр SU Lyn, полученный 9 декабря 2022 г., исправленный за межзвездное покраснение с $E(B - V) = 0.64$ (синяя линия) и спектр красного гиганта спектрального класса M5 III из работы [28]

Если в голубой области спектр объекта отличается от нормальной звезды, то методику, описанную выше, применять нельзя. У симбиотических звезд спектр в голубой области может содержать теплый компонент: псевдофотосферу во время активного состояния или аккреционный диск. При фликкер-эффекте в течение мониторинга блеск красного гиганта изменяется

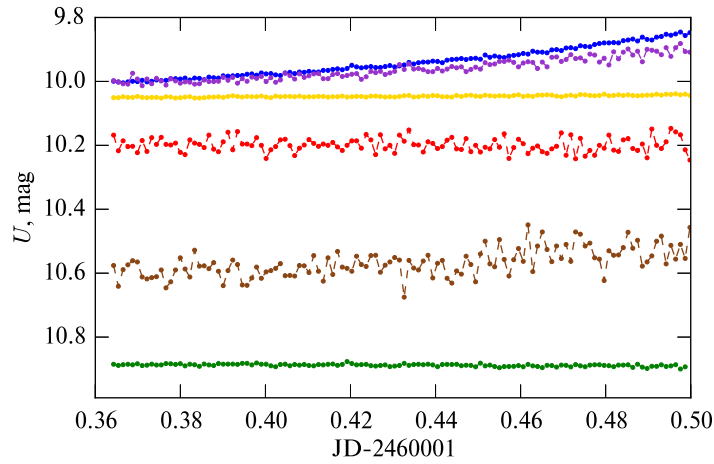


Рисунок 1.9 — Кривые блеска SU Lyn в полосе U (наблюдаемая кривая — синие точки, исправленная за красную утечку — зеленые точки) и звезд сравнения (фиолетовые, коричневые, красные и желтые точки) Кривые блеска звезд сравнения произвольно сдвинуты по оси ординат

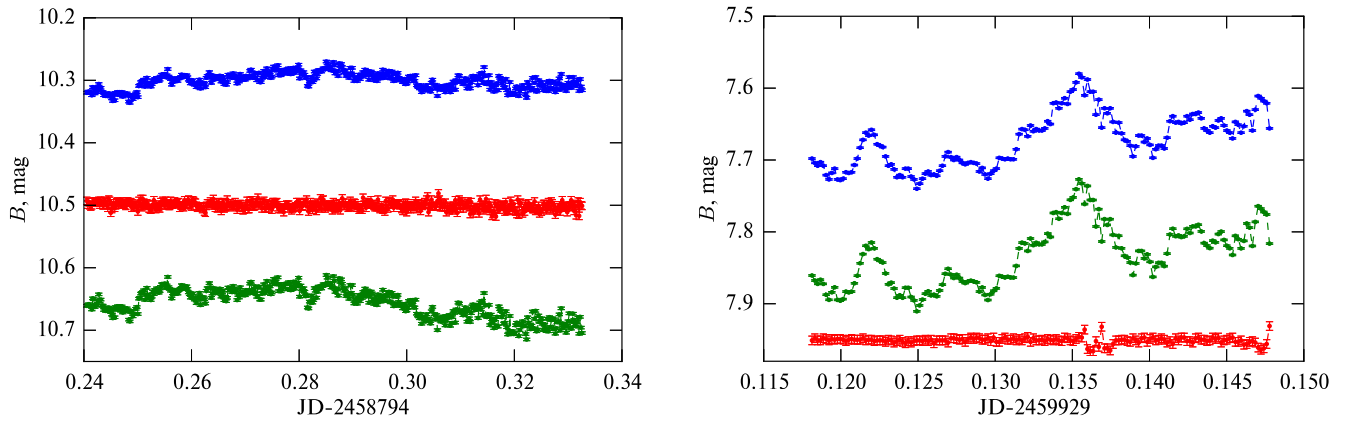
мало, можно считать его вклад постоянным, а блеск аккреционного диска меняется.

При отличии спектра от нормальной звезды красная утечка исправляется следующим образом:

1. Зная спектральный класс, величину межзвездного избытка цвета, блеск в полосе R или I и высоту объекта во время наблюдений с помощью синтетической фотометрии вычисляется количество фотонов красной утечки для данного объекта.
2. Блеск объекта в полосах U или B пересчитывается в поток фотонов, из которого вычитается рассчитанная красная утечка.
3. Полученный поток в фотонах переводится обратно в звездные величины

Используя эту методику были исправлены кривые блеска известной симбиотической звезды SN Sng. Наблюдения проводились 06.11.2019 и 15.12.2022 на RC600 в полосе B (рис. 1.10). Кривые блеска демонстрируют заметные нерегулярные колебания амплитудой 0.07 mag и 0.17 mag, соответственно, что существенно выше уровня шума (~ 0.006 mag).

Для коррекции эффекта красной утечки были использованы следующие параметры SN Sng: холодный компонент относится к спектральному классу M7 III, межзвездное покраснение отсутствует, блеск звезды в полосе R составил ~ 7.2 mag в 2019 г. и ~ 5.3 mag в 2022 г. Наблюдения проводились при высотах объекта от 51° до 25° .



а) 06.11.2019

б) 15.12.2022.

Рисунок 1.10 — Кривые блеска СН Cyg в полосе B (наблюдаемая — синие точки, исправленная за красную утечку — зеленые точки) и контрольной звезды (красные точки), полученные 06.11.2019 (а) и 15.12.2022 (б). Кривые блеска контрольных звезд произвольно сдвинуты по оси ординат

Скорректированные кривые блеска представлены на рис. 1.10. Средняя величина красной утечки в 2019 г. составила ~ 0.4 mag, в 2022 г. — ~ 0.17 mag. Несмотря на то, что в 2019 году холодный компонент системы был на 2 mag слабее, чем в 2022 году, средняя величина красной утечки оказалась почти вдвое выше так как в 2019 году вклад аккреционного диска в блеск системы в полосе B был сильно ниже, что привело к увеличению относительной доли красной утечки.

После учета поправки амплитуда фликкер-эффекта увеличилась: на 30% для мониторинга 06.11.2019 года (с 0.07 mag до 0.10 mag) и примерно на 10% для 2022 года (с 0.17 mag до 0.19 mag). Также стал виден завал на кривой блеска 2019 года, который был скрыт дополнительной утечкой, вызванной увеличением воздушной массы в ходе наблюдений.

Все кривые блеска, полученные на RC600 КГО до 2023 г., приведенные далее, были исправлены за красную утечку. Летом 2023 г. на RC600 были установлены новые фильтры U и B . В новом фильтре B вклад красной утечки пренебрежимо мал, в фильтре U нужно корректировать данные только для звезд с сильным межзвездным покраснением или с пылевой оболочкой ($V - R \gtrsim 1.5$, $E(B - V) > 0.2$).

* * *

Таким образом, в современной астрономии для решения многих астрофизических задач, например изучение фликкер-эффекта или транзитов

экзопланет, требуются мониторинговые фотометрические наблюдения с точностью порядка 0.001 mag. Из-за мерцания в атмосфере это предельная точность для наземных малых телескопов. Такую точность можно достичь только на автоматизированных телескопах, которые могут удерживать звезду на одних и тех же пикселях в течение нескольких часов. Разработанная программа позволяет управлять малыми телескопами ГАИШ МГУ, а также проводить автоматические наблюдения. На телескопе Цейсс-2 автоматические наблюдения проводятся с весны 2025 г., в ближайшее время будет реализовано отслеживание погоды на RC600 и они тоже смогут наблюдать в автоматическом режиме. Программа управления, используя обратную связь по научным кадрам, позволяет достичь субпиксельной точности ведения телескопа при длительных мониторингах. В настоящий момент этот режим применяется на всех трех телескопах, что позволяет получать точность относительной фотометрии 0.001 mag и исследовать малоамплитудные явления.

Фактором, уменьшающим амплитуду фликкер-эффекта у симбиотических звезд, является красная утечка фильтров. Для изучения быстрой переменности блеска используют полосы в коротковолновой части спектра, в которых вклад холодного компонента минимальный. Но из-за небольшого пропускания в красной области в полосах U и B на телескопе RC600 КГО регистрируется дополнительное излучение красного гиганта. Была разработана методика исправления красной утечки в данных, полученных при наблюдении симбиотических звезд. Если в коротковолновой области спектра симбиотическая звезда похожа на одиночный красный гигант, то для коррекции можно применять графики, полученные по спектрам одиночных звезд различных спектральных классов. Если в коротковолновом диапазоне симбиотическая звезда отличается от одиночного красного гиганта, то измеренные звездные величины переводятся в поток, из них вычитается поток красной утечки, затем скорректированный поток переводится обратно в звездную величину. Все кривые блеска, полученные на RC600 КГО до лета 2023 г. были исправлены по описанной методике.

Глава 2. Фотометрический фликкер-эффект

Глава основана на работах 3, 4, 6 из списка публикаций по теме диссертации.

Фликкер-эффект наблюдается у различных источников: молодых звезд [22], катаклизмических переменных [32], рентгеновских двойных [33], активных ядер галактик [34]. Считается, что его основным источником является аккреционный диск [32]. В основном для изучения фликкер-эффекта у всех этих объектов анализируются фотометрические непрерывные наблюдения в течение нескольких часов — мониторинги.

Фликкер-эффект у симбиотических звезд, в отличие от других источников, обнаружить значительно сложнее. Так как вторичным компонентом симбиотических звезд является красный гигант, в красных полосах его вклад наибольший и излучение других компонентов системы на этом фоне не заметно. Поэтому для изучения быстрой переменности наблюдения проводятся в голубой области спектра: в полосах U , B , u' , где вклад красного гиганта резко падает. Кроме этого, аккреционные диски в других системах могут быть изучены по линиям излучения диска в оптическом спектре. В симбиотических звездах эмиссионные линии туманности полностью скрывают линии, образованные в аккреционном диске. Поэтому фликкер-эффект остается почти единственным методом прямого изучения аккреционных дисков в этих системах.

В данный момент быстрая переменность у симбиотических звезд в основном изучается по наземным наблюдениям в коротковолновой области спектра на телескопах небольшого диаметра ($\lesssim 1$ м). Для поиска фликкер-эффекта требуются многочасовые наблюдения, причем их требуется повторять время от времени, так как наличие фликкер-эффекта у симбиотических звезд связано с их активностью и не всегда наблюдается, поэтому время на телескопах большого диаметра для поиска фликкер-эффекта получить достаточно сложно. Это ограничивает количество систем, у которых можно надеяться обнаружить эффект быстрой переменности, так как у симбиотических звезд красный гигант даже в голубой области спектра может вносить значительный вклад, на фоне которого амплитуда фликкер-эффекта может становится меньше предела чувствительности телескопов.

Также выделение быстрой переменности на кривой блеска у симбиотических звезд часто происходит на глаз, когда сравнивают амплитуду изменчивости объекта с близлежащими звездами, не всегда имеющими одинаковый блеск и цвет с объектом. До сих пор не разработана общепринятая методика определения наличия фликкер-эффекта и оценки его амплитуды у симбиотических звезд.

В последнее время космические телескопы, созданные для поиска экзопланет, дают богатый материал для поиска и исследования быстрой переменности у симбиотических звезд. Высокая точность космической фотометрии позволяет находить фликкер-эффект с амплитудой < 0.001 mag. В работе [35] авторы исследовали все известные симбиотические звезды, которые наблюдались на спутнике TESS. Они открыли фликкер-эффект у 13 систем, почти удвоив число известных симбиотических звезд с быстрой переменностью.

Таким образом, наземная фотометрия в голубой области спектра еще долго будет оставаться одним из основных методов регистрации и изучения фликкер-эффекта у симбиотических звезд.

2.1 Наблюдения

Фотометрические наблюдения симбиотических звезд в рамках наших исследований проводились на 60-см телескопах Цейсс-600 и RC600 Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ (КАС) и RC600 Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (КГО) в 2010 -2025 гг. и на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ с ПЗС-камерой NBI.

При наблюдениях симбиотических звезд на телескопе Цейсс-600 используются фильтры U , B , V , Rc , Ic системы Крона–Казинса [36]. Камеры до 2022 г. часто менялись. С 2022 г. на телескопе установлена камера FLI PL16803 4096 × 4096 пикселей, размер пикселя 9 мкм, поле зрения составляет ~ 17 arcmin.

RC600 КГО ГАИШ МГУ оснащен колесом фильтров с полосами U , B , V , Rc , Ic системы Крона–Казинса [36], g' , r' , i' системы SDSS [37], z' системы PAN-STARRS [38] и узкополосными фильтрами $H\alpha$ с различным красным смещением. На телескопе установлена камера Andor iKon-L 2048 × 2048 пикселей, размер пикселя 13.5 мкм, поле зрения составляет ~ 22 arcmin. Далее

в диссертации этот телескоп будет называться просто RC600. На RC600 КАС ГАИШ МГУ установлено колесо фильтров с полосами U , B , V , Rc , Ic системы Крона–Казинса [36], r' , i' системы SDSS [37] и z' системы PAN-STARRS [38]. Телескоп оснащен камерой формата 2048×2048 пикселей, размер пикселя составляет 15 мкм, поле зрения ~ 22 arcmin.

ПЗС-фотометр 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ был оснащен камерой NBI. Размер поля зрения составлял 10 arcmin. Камера представляет собой мозаику из двух чипов 2048×4096 , размер пикселя — 15 мкм. В колесе фильтров установлен набор фильтров, который изменяется в зависимости от принятых к наблюдению программ. Обычно в наборе присутствуют фильтры U , B , V , Rc , Ic системы Крона–Казинса [36] и g' , r' , i' , z' системы SDSS [37].

Мониторинги для поиска и изучения фликкер-эффекта у симбиотических звезд проводились в течение 2 – 10 часов в коротковолновых полосах U , B , u' . Первичная калибровка кадров была выполнена стандартным для ПЗС-фотометрии способом (учет кадров подложки, темнового тока и плоских полей). Измерение блеска звезд на кадрах проводилось методом апертурной фотометрии. При обработке мониторингов в качестве стандартов выбирались наиболее яркие звезды на кадре, сигнал от которых не был перекоплен.

Спектры некоторых симбиотических звезд были получены на Транзиентном Двухлучевом Спектрографе ТДС [39], установленном на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Спектральная разрешающая сила спектрографа с рабочей щелью 1" составляет в синем канале (360 – 577 нм) $R = 1300$, в красном (567 – 746 нм) $R = 2500$. Более подробно спектрограф будет описан в следующей главе. Спектры обрабатывались по методике, описанной в [40].

Для поиска быстрой переменности красного гиганта у StHa 169 были проведены наблюдения в ближнем инфракрасном диапазоне на камере-спектрографе ASTRONIRCAM [41]. В камере установлен детектор Hawaii-2RG 2048×2048 , в фотометрическом режиме [42] используется только центральная часть детектора форматом 1024×1024 . Поле зрения камеры в фотометрическом режиме 4.5 arcmin. В колесе фильтров установлено 13 фильтров, в том числе J , H , K , Y системы MKO-NIR [43].

Для исследования наличия пыли в системе симбиотической звезды SN Sng были проанализированы фотометрические наблюдения в инфракрасном диапазоне, полученные с помощью одноканального InSb-фотометра [44] на 1.25-м зеркальном телескопе имени Энгельгардта (ЗТЭ) КАС ГАИШ МГУ

и фотометра среднего инфракрасного диапазона LMP [45] на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Наблюдения на InSb-фотометре проводились с 1994 по 2025 г. в полосах J , H , K , L и M в системе Джонсона [46]. На LMP СН Cyg наблюдают с января 2025 г. в полосах L и M системы MKO-NIR [43].

2.2 Периодограмма Ломба-Скаргла

Для исследования фликкер-эффекта у различных классов объектов обычно анализируется спектр мощности.

Существует большое количество методов периодического анализа, которые в целом можно разделить на несколько классов [47]:

1. Методы Фурье-анализа — методы, основанные на преобразовании Фурье. Например, периодограмма Шустера [48], периодограмма Ломба-Скаргла [49; 50], корреляционный метод Эдельсона и Кролика [51].

2. Методы фазового свертывания, основанные на свертке наблюдений с периодом и поиске экстремума функции ошибок. Например, «Метод натянутой струны» [52], метод с использованием дисперсионного анализа [53], минимизация фазовой дисперсии [54], модель с фазовым усреднением [55] и метод условной энтропии [56].

3. Методы наименьших квадратов предполагают аппроксимацию данных моделью для каждой перебираемой частоты. Частота, при которой отклонения наблюдений от модели минимальны, считается частотой колебаний системы. Например, периодограмма Ломба-Скаргла и «Суперусреднение» [57]. Также применяют методы, в которых минимизируется не квадрат невязок, а другая величина, например, в методе Шварценберга-Черны [58] ряд аппроксимируется ортогональными полиномами и используется дисперсионный анализ.

4. Байесовские подходы основаны на применении теории байесовской вероятности. Например, модель Ломба-Скаргла Бреттхорста [59], модель с фазовым усреднением [55], модели гауссовских процессов [60] и модели, основанные на стохастических процессах [61].

Сравнивая различные методы поиска периода в реальных данных Грэхем и др. [62] обнаружили, что ни один метод не превосходит другие по эффек-

тивности. Выбор метода поиска периода определяется задачей и априорными знаниями о форме изменений сигнала.

Для анализа фликкер-эффекта у симбиотических звезд в нашей работе применялась периодограмма Ломба-Скаргла. Она позволяет выделить период у систем, в которых быстрая переменность связана с вращением белого карлика с сильным магнитным полем, и поэтому блеск меняется с сохраняющимся периодом. Также с её помощью был построен спектр мощности фликкер-эффекта, связанного с аккреционным диском.

Выбор в пользу периодограммы Ломба-Скаргла обусловлен необходимостью анализа неравномерных временных рядов. Она широко применяется в астрономии, поэтому для нее разработаны оптимизированные реализации в популярных пакетах (таких как `astropy` для Python) и существует подробное описание правильного применения (например, [47]) периодограммы к астрономическим данным и возможные ошибки, возникающие при ее интерпретации. Кроме того, эту периодограмму можно вывести из методов, принадлежащих к разным классам, перечисленным выше, она является своеобразной точкой их пересечения, поэтому полученные результаты могут быть интерпретированы с точки зрения разных подходов.

Рассмотрим периодограмму Ломба-Скаргла подробнее. Значения классической периодограммы для равномерной выборки гауссовского шума распределены по χ^2 . Это распределение не сохраняется для неравномерной выборки, и в общем случае распределение значений периодограммы не может быть выражено аналитически. Для решения этой проблемы Скаргл [50] рассмотрел обобщенную форму периодограммы, которая удовлетворяет следующим условиям:

1. Периодограмма сводится к классической периодограмме в случае равномерных наблюдений.
2. Распределение значений периодограммы может быть выражено аналитически.
3. Периодограмма не изменяется при сдвиге времени всех наблюдений на одинаковый промежуток времени.

Уравнение периодограммы Ломба-Скаргла можно записать:

$$P_{LS}(f) = \frac{1}{2} \left(\left(\sum_n g_n \cos(2\pi f[t_n - \tau]) \right)^2 / \sum_n g_n \cos^2(2\pi f[t_n - \tau]) + \right. \\ \left. + \left(\sum_n g_n \sin(2\pi f[t_n - \tau]) \right)^2 / \sum_n g_n \sin^2(2\pi f[t_n - \tau]) \right), \quad (2.1)$$

где g_n — сигнал в момент времени t_n , f - частота, $\tau = \frac{1}{4\pi f} \arctg \left(\frac{\sum_n \sin(4\pi f t_n)}{\sum_n \cos(4\pi f t_n)} \right)$

Если рассматривать периодограмму Ломба-Скаргла с позиции метода наименьших квадратов ([49]), то сдвиг τ делает ортогональными нормальные уравнения, и статистические свойства периодограммы становятся идентичными классической периодограмме Фурье. Данная простая форма периодограммы 2.1 применима, если шум не коррелированный, что выполняется для наших данных.

Для поиска периода была использована модификация метода Ломба-Скаргла — метод с плавающим средним [63], когда для каждой частоты к синусоиде добавляется смещение. Этот метод позволяет выделять правильный период, когда наблюдения покрывают не все фазы изменений блеска объекта. При добавлении смещения свойства периодограммы Ломба-Скаргла, описанные выше, не изменяются.

Для периодограммы Ломба-Скаргла не существует алгоритмов, которые бы правильно очищали периодограмму от ложных пиков, вызванных функцией окна [47]. Поэтому для оценки мощности функции окна для всех наблюдений была построена стандартная периодограмма Ломба-Скаргла для кривых блеска, где значения измерений были заменены на 1, при этом данные не были центрированы и не использовался метод с плавающим средним:

$$P_W(f; \{t_n\}) = \left| \sum_{n=1}^N e^{-2\pi f t_n} \right|^2 \quad (2.2)$$

Затем мощность функции окна сравнивалась с периодограммой, полученной по наблюдениям, ложные пики отбрасывались.

Наиболее достоверным методом оценки наличия периода в данных является расчет вероятности ложной тревоги (FAP). Она показывает вероятность того, что набор данных без сигнала, из-за случайного совпадения ошибок, приведет к пику аналогичной величины. Достоверными считались пики, для которых $FAP < 0.0006\%$ (5σ).

2.3 Вейвлет-анализ

Вейвлет-анализ [64] — это современный и перспективный метод обработки данных, с помощью которого можно анализировать сигнал по времени и по частоте одновременно, что не позволяет делать Фурье-анализ. Прямое вейвлет-преобразование функции $f(x)$ записывается в виде:

$$W_{\psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{C_{\psi}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx,$$

где $W_{\psi}(a,b)$ — набор вейвлет коэффициентов, ψ — анализирующий вейвлет (базисный вейвлет), который образует набор функций $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ путем сжатия и растяжения, a и b — параметры, определяющие соответственно масштаб и смещение функции ψ , C_{ψ} — нормировочный множитель.

Обратное вейвлет-преобразование вычисляется по формуле:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{C_{\psi}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) W_{\psi}(a,b) \frac{da db}{a^2}.$$

Ограничением на выбор базисного вейвлета является условие конечности нормировочного множителя C_{ψ} :

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty,$$

где $\hat{\psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) e^{-i\omega x} dx$ - Фурье-преобразование вейвлета ψ .

Условие конечности C_{ψ} можно переписать в виде:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0$$

Вейвлет-анализ осуществляется следующим образом: вейвлет сдвигается вдоль всего сигнала, и его огибающая сравнивается с огибающей сигнала на каждом сдвиге. Затем изменяется масштаб вейвлета, и снова проводится сравнение огибающих. При очень малой длительности вейвлета по сравнению с периодом сигнала коэффициенты стремятся к постоянному значению. Если на длительности вейвлета укладывается много периодов, положительные и отрицательные значения компенсируют друг друга, что приводит к малым значениям

коэффициентов. Это позволяет вейвлету автоматически выделять локальное среднее сигнала. Максимальное значение амплитуды колебаний вейвлет-коэффициентов наблюдается, когда период сигнала совпадает с длительностью вейвлета.

Кривая блеска за период — гладкая функция, поэтому для поиска периода использовался гладкий базисный вейвлет «Мексиканская шляпа» [65; 66], который описывается функцией: $\psi(x) = (x^2 - 1)e^{-\frac{x^2}{2}}$.

2.4 Применение диаграмм Ломба-Скаргла и вейвлет-анализа к кривым блеска симбиотических звезд

У симбиотических звезд быстрая переменность может отсутствовать, может быть связана с вращением белого карлика с сильным магнитным полем (по типу промежуточных поляров) и иметь определенный период или быть связанной с переменностью аккреционного диска (фликкер-эффект).

В работе считалось, что быстрая переменность у объекта отсутствует, если на периодограмме Ломба-Скаргла (рис. 2.1) не было пиков, для которых вероятность ложной тревоги $FAR < 0.0006\%$ (5σ).

Быстрая переменность блеска по типу промежуточных поляров имеет неизменный период, равный периоду вращения белого карлика. На периодограмме Ломба-Скаргла в этом случае наблюдается узкий пик (рис. 2.2 б). Также на периодограмме иногда присутствуют ложные пики из-за функции окна. Для определения истинного пика сначала строилась периодограмма Ломба-Скаргла, затем строился график вейвлет коэффициентов (рис. 2.2 в), искались периоды которые присутствуют на обоих графиках.

Фликкер-эффект у симбиотических звезд обычно имеет небольшую относительную амплитуду и не является периодическим процессом, поэтому при усреднении по всей кривой блеска при построении периодограммы Ломба-Скаргла спектральная плотность фликкер-эффекта может быть мала. Также необходимо учитывать спектр окна, так как наблюдения проводятся с экспозицией от 10 секунд до 5 минут, а характерное время фликкер-эффекта составляет от нескольких минут до нескольких часов. Таким образом, в спектре появляются ложные пики большой интенсивности, усложняющие поиск

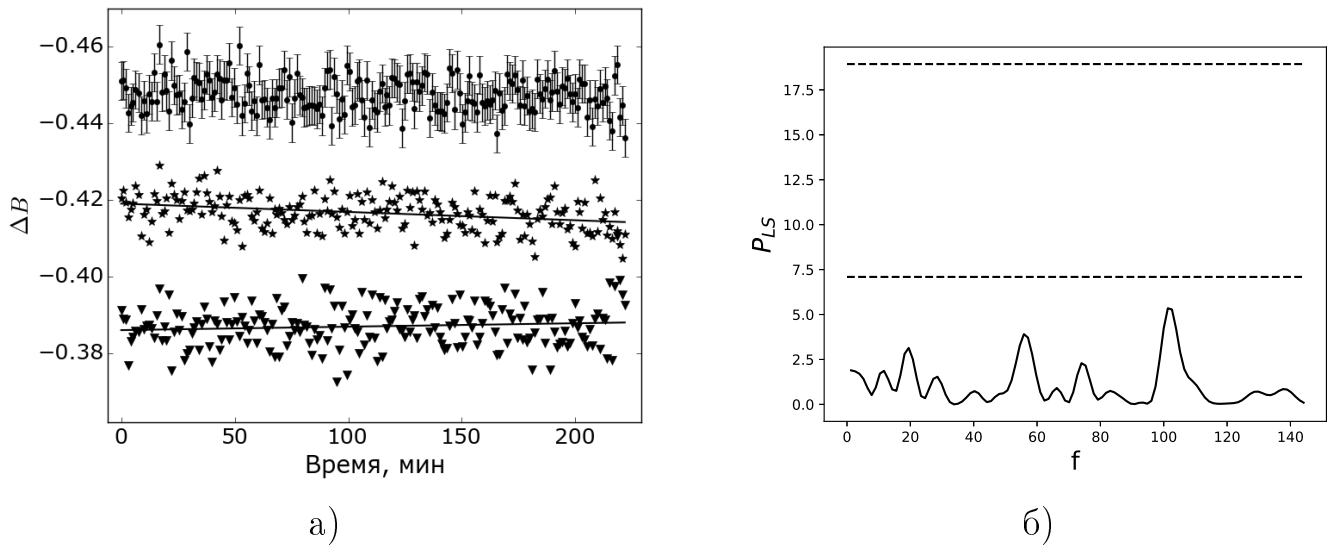


Рисунок 2.1 — Фотометрический мониторинг AX Per в полосе B , полученный 18.08.2024 на Цейсс-600 КАС, в котором быстрая переменность блеска отсутствует: а) кривая блеска (точки), звездочками и треугольниками обозначены измерения блеска для звезд сравнения; б) периодограмма Ломба-Скаргла. Пунктирной линией отмечены вероятность ложной тревоги (FAP) 0.0006% и 5%

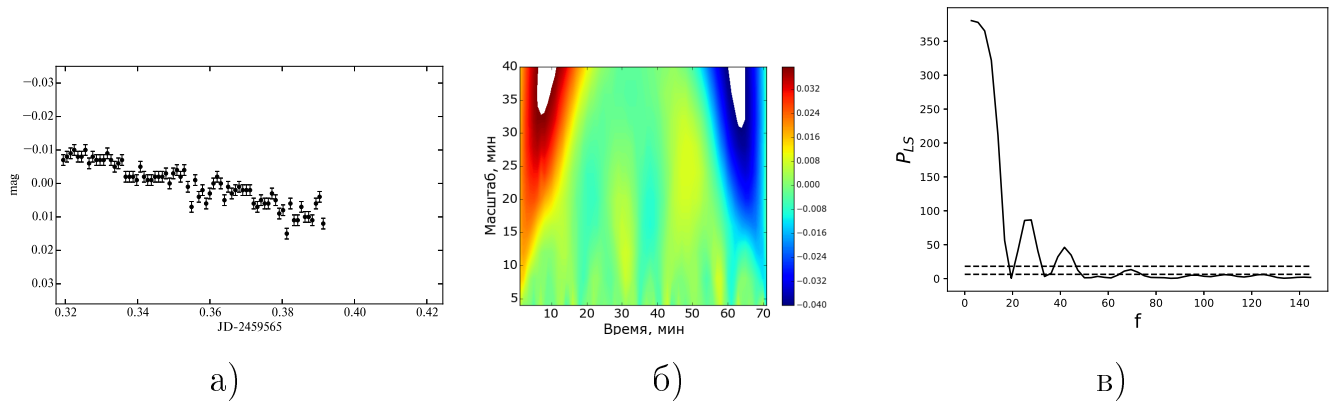


Рисунок 2.2 — Фотометрический мониторинг Z And в полосе U , полученный 16.12.2021 на NBI 2.5-м. телескопа КГО. У Z And переменность связана с вращением белого карлика с сильным магнитным полем: а) кривая блеска; б) график вейвлет-коэффициентов; в) периодограмма Ломба-Скаргла. Пунктирной линией отмечены вероятность ложной тревоги (FAP) 0.0006% и 5%

фликкер-эффекта. Поэтому для более уверенного выделения быстрой переменности, сначала строилась периодограмма Ломба-Скаргла (например, рис. 2.3 б), а затем наличие фликкер-эффекта уточнялось по вейвлет преобразованию (например, рис. 2.3 в).

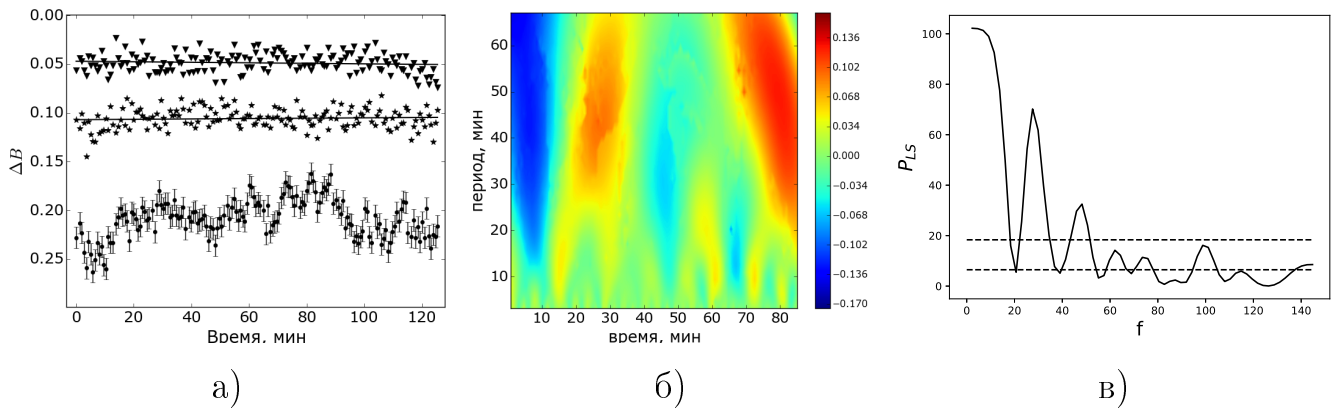


Рисунок 2.3 — Фотометрический мониторинг CSS 1102 в полосе B , полученный 10.07.2021 на RC600 КГО, в котором у CSS1102 был обнаружен фликкер-эффект: а) кривая блеска (точки), звездочками и треугольниками обозначены измерения блеска для звезд сравнения; б) график вейвлет-коэффициентов; в) периодограмма Ломба-Скаргла. Пунктирной линией отмечены вероятность ложной тревоги (FAP) 0.0006% и 5%

2.5 Симбиотические звезды без фликкер-эффекта

У симбиотических звезд фликкер-эффект — редкое явление. До 2021 г. было известно всего 12 систем с этим эффектом ([67] и ссылки там). Работа [35], вышедшая в 2024 г., резко увеличила это число до 30 систем из более чем 300 симбиотических звезд. Сначала рассмотрим системы, принадлежащие к различным классам симбиотических звезд, у которых в наших наблюдениях фликкер-эффект не был обнаружен.

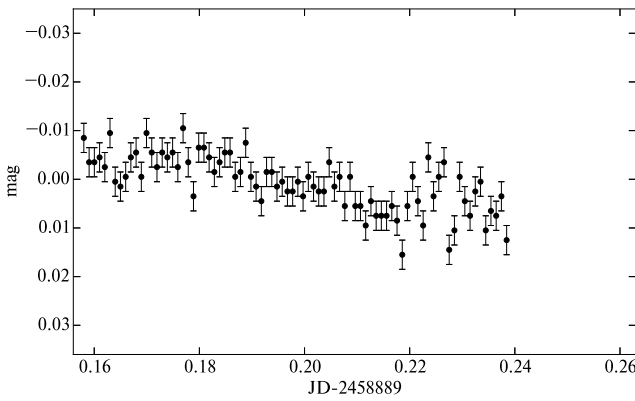
2.5.1 Классические симбиотические звезды

Z And относится к редкому классу симбиотических звезд, у которых быстрая переменность связана с вращением белого карлика с сильным магнитным полем. Система похожа на промежуточный поляр, блеск системы возрастает, когда с Земли видны полярные области белого карлика. Иногда такие системы также относят к симбиотическим звездам с фликкер-эффектом, но мы будем рассматривать их в этой главе, так как быстрая переменность не связана с аккреционным диском. Z And наблюдалась в КГО 09.02.2020 и 14.08.2021 на

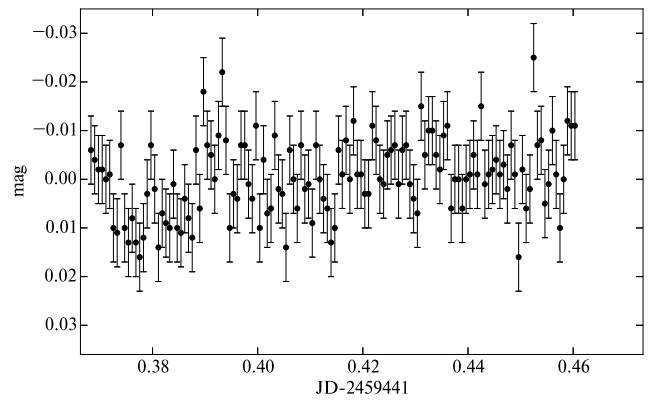
RC600 и 16.12.2021 на 2.5-метровом телескопе, на КАС 25.10.2024 на Цейсс-600. Журнал наблюдений приведен в таблице 1, кривые блеска представлены на рис. 2.4.

Таблица 1 — Характерное время и амплитуда фликкер-эффекта Z And.

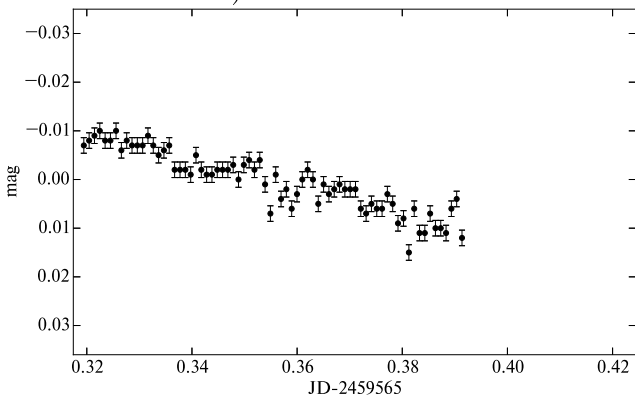
Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса	Телескоп
20200209	0.003	2.5	105	<i>U</i>	RC600
20210814	0.007	2.2	130	<i>B</i>	RC600
20211216	0.0016	1.7	72	<i>U</i>	2.5-м
20241025	0.006	3.4	181	<i>B</i>	Цейсс-600



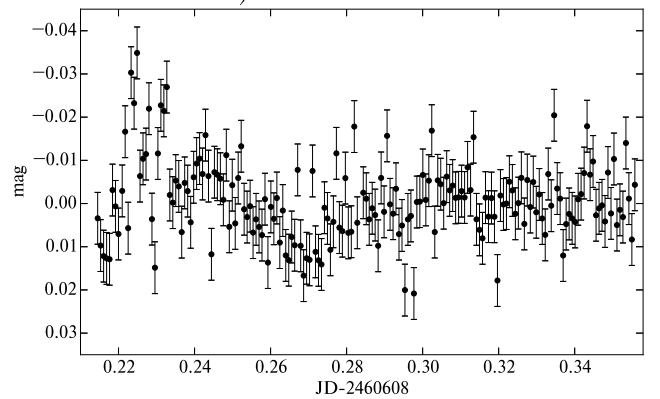
а) 2020-02-09



б) 2021-08-14



в) 2021-12-16



г) 2024-10-25

Рисунок 2.4 — Кривые блеска Z And, полученные 09.02.2020 (а), 14.08.2021 (б), 16.12.2021 (в) и 25.10.2024 (г).

Период изменения блеска совпадает с периодом вращения белого карлика, его можно считать постоянным, поэтому для его выделения применялась периодограмма Ломба-Скаргла (подробно рассмотренная в 2.2). Пример периодограммы приведен на рис. 2.5. На ней наблюдается два пика, которые выше

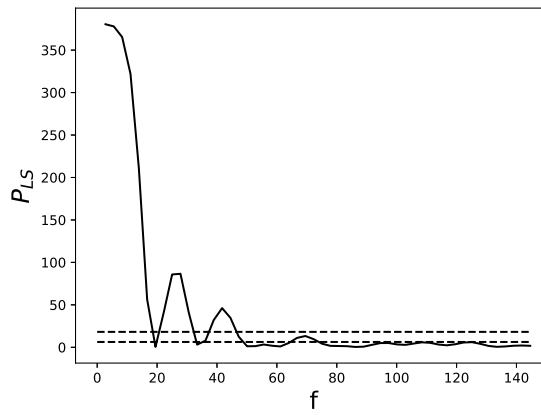


Рисунок 2.5 — периодограмма Ломба-Скаргла, построенная по кривой блеска, полученной 16.12.2021. Пунктирной линией отмечены вероятность ложной тревоги 0.0006% и 5%.

вероятности ложной тревоги 0.0006%. Пик с частотой 26.5 дней^{-1} является ложным. Таким образом, характерное время изменения блеска составило примерно 30 минут, амплитуда переменности 0.005 mag . Переменность была зарегистрирована 09.02.2020 и 16.12.2021, а 14.08.2021 и 25.10.2024 из-за достаточно больших ошибок фотометрии пик на периодограмме, связанный с периодом вращения белого карлика, практически не выделялся на фоне ложных пиков. Для более точного определения времени переменности необходимы длительные мониторинги (в течение 6-7 часов [68] или нескольких десятков дней, как, например, наблюдали на TESS [35]). При длительности мониторингов около 2 часов наблюдается всего несколько периодов, этого недостаточно для точного определения характерного времени переменности на фоне шума из-за малой амплитуды переменности Z And, которая составляет несколько тысячных и сравнима с ошибками фотометрии. Полученное характерное время и амплитуда фликкер-эффекта близки к амплитуде $0.002 - 0.005 \text{ mag}$ и периоду 28 минут, указанных в работе [68].

V1413 Aql — необычная классическая симбиотическая звезда: она постоянно находится в активном состоянии, в отличие от других звезд, относящихся к данному типу, которые в спокойном состоянии остаются значительно дольше, чем в активном. Многоцветные оценки блеска этой системы на телескопе Цейсс-600 КАС проводятся более 30 лет. Также с 2019 г. её стали наблюдать на RC600 КГО. Кривая блеска системы в полосе V за 1991 - 2025 гг. приведена на рис. 2.6. За это время наблюдалось более 10 затмений и было зарегистрировано три вспышки: в 2010, 2020 и 2025 г.

В спектральном распределении энергии у V1413 Aql присутствует теплый компонент, который, возможно, является аккреционным диском. Во время вспышки его спектральный класс оценивается как F5 III [69], между вспышками он может быть более поздним — до K2 III [70]. Относительно низкая эффективная температура этого компонента позволяет предположить, что мы наблюдаем аккреционный диск практически с ребра, регистрируя излучение его внешних, более холодных слоев.

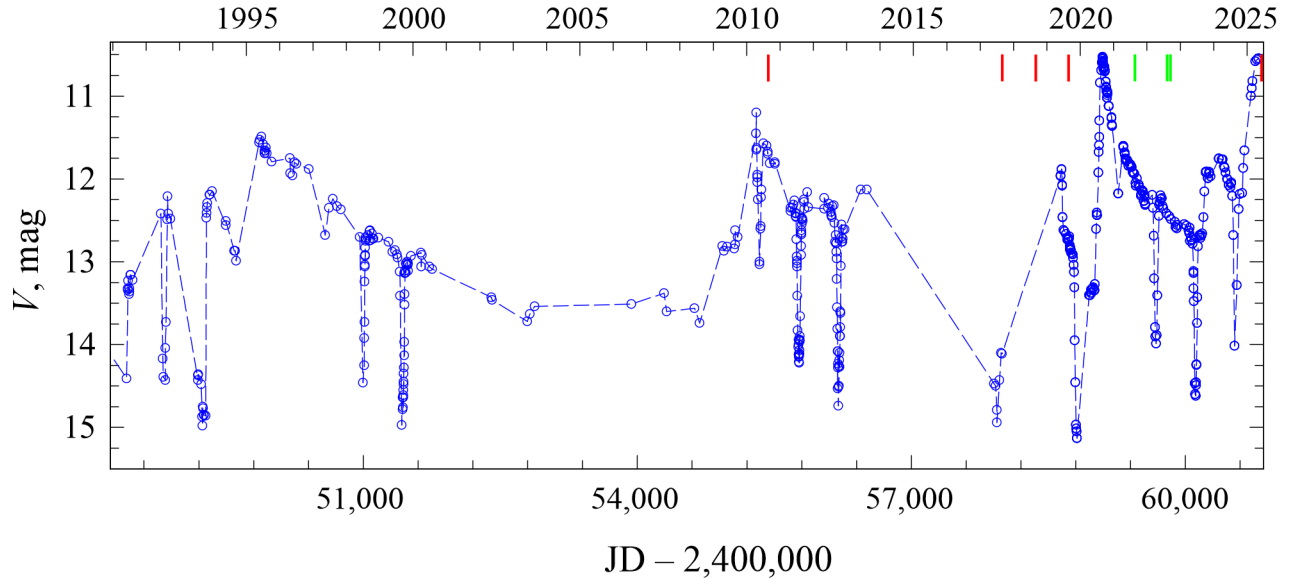


Рисунок 2.6 — Кривая блеска V1413 Aql в полосе V (1991 - 2025 гг.). Красными вертикальными линиями отмечены моменты получения нами мониторингов для поиска фликкер-эффекта. Зелеными вертикальными линиями отмечены моменты наблюдения спутника TESS, в которых был найден фликкер-эффект [35].

Мониторинги для поиска быстрой переменности проводились между двумя вспышками системы в 2010 г. и 2020 г. и во время вспышки в 2025 г. на телескопе Цейсс-600 КАС. Журнал наблюдений представлен в таблице 2. Фотометрические мониторинги в 2010 г. были получены через 4 месяца после начала вспышки, во время ее максимума. Хотя в это время в спектрах системы присутствовал теплый компонент [70], фликкер-эффект обнаружен не был. После вспышки 2010 г. система пришла в относительно спокойное состояние в 2017 году. В пяти мониторингах, полученных в 2017–2019 гг., быстрая переменность также не была зарегистрирована. Наблюдения проводились на разных орбитальных фазах, поэтому отсутствие фликкер-эффекта не может быть вызвано затмением горячего компонента. Таким образом, до 2019 года быстрая переменность у V1413 Aql отсутствовала.

Таблица 2 — Фотометрические мониторинги V1413 Aql.

Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса
20100725	0.007	2.5	120	<i>B</i>
20100726	0.008	2.4	115	<i>B</i>
20100729	0.015	2.1	98	<i>B</i>
20170814	0.006	3.8	91	<i>B</i>
20180801	0.008	4.4	57	<i>B</i>
20180801	0.05	4	51	<i>U</i>
20190808	0.006	3	82	<i>B</i>
20190913	0.02	2.8	30	<i>U</i>
20250618	0.004	2.9	279	<i>B</i>
20250622	0.004	5	264	<i>B</i>

В работе [35] по данным спутника TESS у V1413 Aql был найден фликкер-эффект с амплитудой около 0.01 mag. Но авторы отмечают, что сигнал от V1413 Aql может быть загрязнен излучением звезды-соседки, что может приводить к ложному обнаружению фликкер-эффекта. Полоса пропускания TESS (600–1000 нм) охватывает красную область спектра, где излучение системы определяется в основном красным гигантом. В полосах *U* и *B*, наоборот, преобладает излучение аккреционного диска, поэтому амплитуда фликкер-эффекта должна быть больше и легко регистрироваться при наземных наблюдениях. К сожалению, отсутствие спектров и мониторингов, полученных во время наблюдений TESS, не позволяют проверить, был ли виден теплый компонент системы и наблюдался ли фликкер-эффект в полосах *U* или *B*. В литературе также нет независимых подтверждений быстрой переменности в это время, а во время предыдущей вспышки при похожем по блеску состоянию системы фликкер-эффект зарегистрирован не был. В мониторингах, полученных в 2025 г. почти в максимуме вспышки, также не был обнаружен фликкер-эффект. Но в начале наблюдений 22 июня 2025 г. блеск системы резко возрос > 0.05 mag примерно за 40 минут (рис. 2.7). То есть блеск системы меняется на промежутках времени порядка нескольких часов, но эти изменения не являются фликкер-эффектом, а, возможно, связаны с неустойчивым переносом массы на горячий компонент.

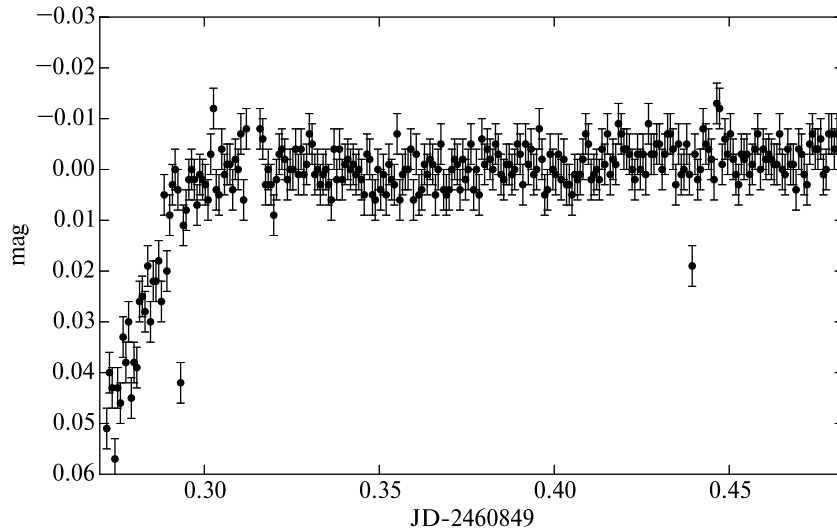


Рисунок 2.7 — Кривая блеска V1413 Aql, полученная 22 июня 2025 г. в полосе *B*.

Таким образом, в наших наблюдениях фликкер-эффект у V1413 Aql не был зарегистрирован, хотя в спектральном распределении энергии присутствует теплый компонент, который, возможно, является аккреционным диском. Отсутствие фликкер-эффекта может объясняться тем, что мы наблюдаем диск с ребра и не видим его внутренние области, где образуется фликкер-эффект. Либо теплый компонент является не аккреционным диском, а псевдофото-сферой вокруг белого карлика. Также у V1413 Aql была зарегистрирована переменность на масштабах времени несколько часов, но она не является фликкер-эффектом.

AX Per, YY Her и BF Cyg — хорошо известные классические симбиотические звезды. Они были открыты как переменные в начале 20 в., симбиотическая природа AX Per была обнаружена в 1932 г. ([71]), YY Her и BF Cyg — в 1950 г. ([72], [73]). У YY Her и BF Cyg холодный компонент заполнил свою полость Роша ([74], [75]), то есть скорость аккреции должна быть достаточно большой, чтобы образовался аккреционный диск и наблюдался фликкер-эффект. У AX Per холодный компонент не заполняет полость Роша, но в активном состоянии, которое началось в 2007 г., в спектре появилось излучение аккреционного диска ([76]). Все системы — затменные, орбитальный период AX Per составляет 680.83 дня ([76], у YY Her — 586 дней [74], у BF Cyg — 757.2 дня [77]).

Фотометрические наблюдения AX Per проводились на телескопе Цейсс-600 КАС с 2011 года (табл. 3) между вспышками типа Z And. Фликкер-эффект с амплитудой больше 0.005 mag не наблюдался.

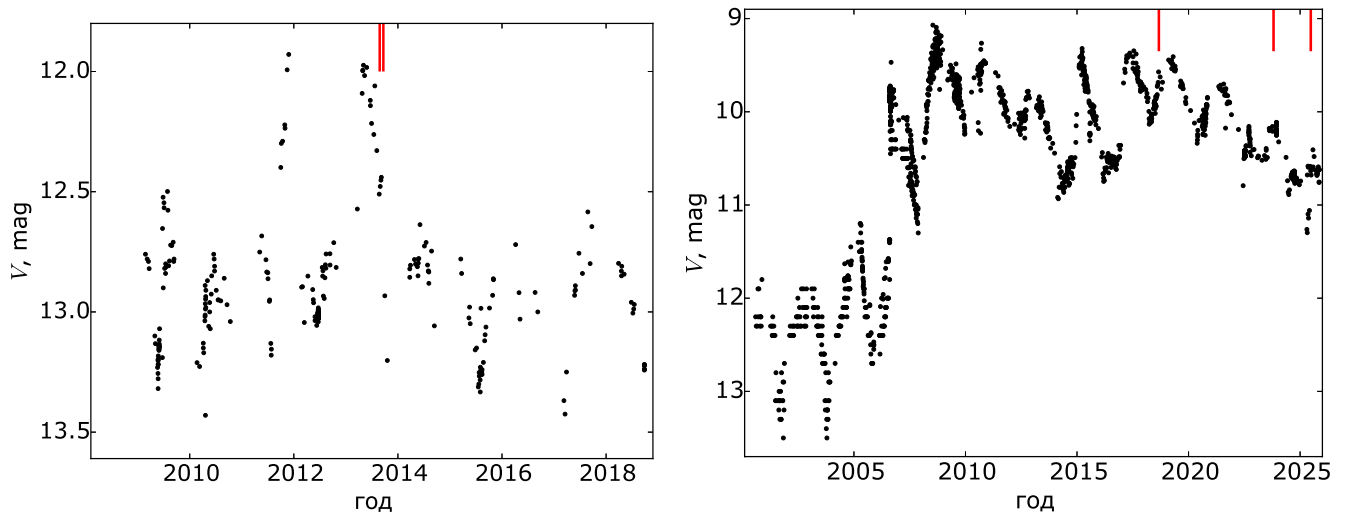
Таблица 3 — Фотометрические мониторинги AX Per.

Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса
20211002	0.006	0.6	56	<i>B</i>
20240818	0.005	0.8	129	<i>B</i>
20241011	0.005	0.5	100	<i>B</i>
20241106	0.006	0.5	97	<i>B</i>

Таблица 4 — Фотометрические мониторинги YY Her.

Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса
20130723	0.005	2	115	<i>B</i>
20130820	0.005	2	40	<i>B</i>

Для YY Her было получено 2 мониторинга на Цейссе-600 КАС в 2013 году (таблица 4) во время возвращения звезды после вспышки к спокойному состоянию (рис. 2.8 а). Фликкер-эффект обнаружен не был.



а) YY Her

б) BF Cyg

Рисунок 2.8 — Кривые блеска YY Her (слева) и BF Cyg (справа) по данным AAVSO в полосе *V*. Красными вертикальными линиями отмечены моменты получения мониторингов.

Для BF Cyg в работе [78] авторы зарегистрировали быструю переменность данной системы в 1997-1998 гг., но амплитуда в полосе *B* составляла несколько сотых, что было сравнимо с точностью наблюдений. В 2006 г. звезда перешла

Таблица 5 — Фотометрические мониторинги ВF Cуг.

Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса	Телескоп
20180806	0.006	0.6	56	<i>B</i>	Цейсс-600
20180809	0.005	0.8	129	<i>B</i>	Цейсс-600
20180813	0.005	0.5	100	<i>B</i>	Цейсс-600
20180815	0.006	0.5	97	<i>B</i>	Цейсс-600
20180816	0.003	1.25	300	<i>B</i>	Цейсс-600
20230922	0.007	2.2	403	<i>B</i>	RC600
20240814	0.005	2.1	118	<i>B</i>	Цейсс-600
20250424	0.005	1.9	145	<i>B</i>	Цейсс-600

в активное состояние и стала ярче на 2^m (рис. 2.8 б). В 2003 г. у ВF Cуг наблюдалась быстрая переменность, связанная с вращением белого карлика, по типу промежуточных поляров, с амплитудой 0.007^m и периодом 1.806 часа. В 2004 г. амплитуда уменьшилась в 2 раза, в 2007 г. переменности зарегистрировано не было [79]. Наши наблюдения, проводимые с 2018 г. (таблица 5), показали отсутствие быстрой переменности с амплитудой больше нескольких тысячных звездной величины, связанной как с присутствием аккреционного диска в системе, так и вращением белого карлика. Но, возможно, мы не увидели период, связанный с вращением белого карлика, так как мониторинги длились не более 2.2 часов, что совсем немного больше одного периода.

Таким образом, у AX Per, YY Her и ВF Cуг быстрой переменности в наших наблюдениях зарегистрировано не было. В системах, возможно, присутствуют аккреционные диски, но так как системы затменные, то, как и в случае V1413 Aql, мы видим аккреционные диски с ребра, и поэтому фликкер-эффект не регистрируется. В случае ВF Cуг аккреционный диск может быть разрушен сильным магнитным полем белого карлика. Сейчас, когда ВF Cуг находится в активном состоянии, переменность, связанная с вращением белого карлика, может быть замята возросшим излучением системы. При возвращении ВF Cуг в спокойное состояние, возможно, быстрая переменность опять будет зарегистрирована.

Таблица 6 — Фотометрические мониторинги StHa 169.

Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса	Телескоп
20230818	0.009	2.3	67	<i>B</i>	Цейсс-600
20240827	0.019	3.2	95	<i>B</i>	Цейсс-600
20240716	0.005	1.5	575	<i>J</i>	2.5-м. КГО

StHa 169 — давно известная, но малоизученная симбиотическая система. Она была открыта в 1988 году [80]. В 2016 г. [81] у нее была зарегистрирована вспышка по типу классической симбиотической звезды.

Для поиска фликкер-эффекта были проведены мониторинги StHa 169 на телескопе Цейсс-600 КАС (табл. 6) в 2023 г. и 2024 г. Фликкер-эффект обнаружен не был.

В последние годы уникальную возможность для анализа фотометрического поведения симбиотических звезд на разных шкалах времени предоставили космические миссии Kepler и TESS, изначально предназначенные для поиска экзопланет. В их рабочих спектральных диапазонах доминирующий вклад в полный блеск системы принадлежит красному гиганту. Обычно красные гиганты — переменные звезды на различных временных шкалах: у них наблюдаются как долгопериодические пульсации с периодами от десятков до сотен дней, так и короткопериодические колебания, связанные с процессами грануляции. В данных Kepler для StHa 169 была зарегистрирована переменность с периодом около 34 суток, соответствующая пульсациям гиганта. В работе [35] было продемонстрировано, что фликкер-эффект в симбиотических звездах формирует характерный спектр мощности, статистически отличный от спектров одиночных красных гигантов. Применив этот диагностический критерий к данным TESS, авторы не обнаружили признаков фликкер-эффекта в кривой блеска StHa 169. Отсутствие фликкер-эффекта и подтвержденные пульсации гиганта, делают StHa 169 удобным объектом для поиска и исследования статистических свойств переменности красного гиганта в симбиотической системе. Для поиска короткопериодической переменности холодного компонента был проведен фотометрический мониторинг системы в инфракрасном диапазоне на AstroNIRCam на 2.5-м. телескопе КГО в полосе *J* (табл. 6). К сожалению, переменности красного гиганта обнаружено не было на уровне < 0.005 mag.

Таблица 7 — Фотометрические мониторинги LT Del.

Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса
20230821	0.012	1.2	31	<i>B</i>
20240812	0.015	0.5	17	<i>B</i>
20240817	0.011	1.6	47	<i>B</i>
20241014	0.015	3.3	93	<i>B</i>

Таблица 8 — Фотометрические мониторинги CM Aql и StHA 32.

Объект	Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек
CM Aql	20240812	0.02	1.6	48
StHA 32	20241104	0.015	3	47

LT Del относится к редкому классу желтых симбиотических звезд. Холодный компонент LT Del имеет спектральный класс G6-K0 [82; 83]. У нее было зарегистрировано 2 вспышки типа Z And в 1994 г. ([84]) и 2017 г. ([85]). LT Del наблюдалась нами в 2023-2024 гг. (табл. 7) на телескопе Цейсс-600 КАС, когда блеск системы уже вернулся к состоянию до вспышки. Фликкер-эффект не был обнаружен ни в одну дату с точностью до сотых звездной величины.

Также для поиска фликкер-эффекта были получены мониторинги на Цейсс-600 КАС в полосе *B* малоизученных классических симбиотических звезд StHA 32 и CM Aql (табл. 8). У обоих объектов фликкер-эффект зарегистрирован не был. Относительно большие ошибки фотометрии LT Del, CM Aql и StHA 32 связаны со слабостью звезд, их блеск в полосе *B* составляет ~ 14.5 mag, ~ 16.5 mag и ~ 14 mag соответственно.

В работе также исследовались две симбиотические звезды AG Peg и V426 Sge. Особенность этих систем в том, что у них зафиксированы два разных типа вспышек: и как у классических новых, и как у звезд типа Z Андромеды. AG Peg и V426 Sge стали первыми известными объектами с такой двойной вспышечной активностью. Сейчас находят всё больше симбиотических звезд, у которых наблюдаются оба типа вспышек, что делает эти системы важными примерами для понимания физических процессов в симбиотических звездах.

Таблица 9 — Фотометрические мониторинги AG Peg.

Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса
20150821	0.009	3.6	121	<i>B</i>
20180812	0.007	0.24	91	<i>B</i>

AG Peg вспыхнула как новая в середине 19 века. До 1996 г. продолжался медленный спад яркости, затем она перешла в спокойное состояние. В 2015 г. у нее наблюдали две вспышки как у классических симбиотических звезд [86]. Система состоит из красного гиганта спектрального класса M3 [87] и белого карлика с $T_{eff} = 150\,000$ K [88]. Орбитальный период AG Peg равен 816.5 дням [89].

AG Peg наблюдалась 2 раза на телескопе Цейсс-600 (таблица 9): 21.08.2015 между двумя вспышками, похожими на вспышки классических симбиотических звезд, и 12.08.2018, когда блеск системы вернулся к значению до вспышек (рис. 2.9). Фликкер-эффект в оптическом диапазоне (полоса *B*) в наших данных обнаружен не был. Но 16 ноября 2017 быстрая переменность была зарегистрирована в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах [90]. Неодинаковое поведение фликкер-эффекта в разных диапазонах указывает либо на различные области и механизмы формирования излучения в AG Peg [90], или на слишком высокую температуру диска, который не остыл после вспышек.

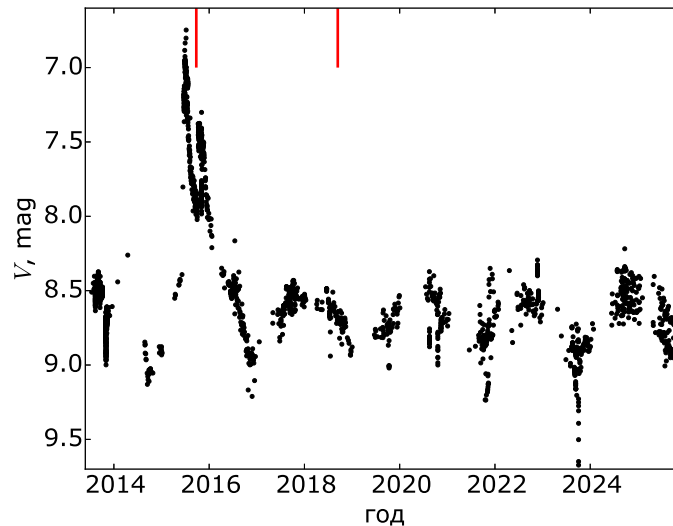


Рисунок 2.9 — Кривая блеска AG Peg в полосе *V* по данным AAVSO. Красными вертикальными линиями отмечены моменты получения мониторингов

Симбиотическая природа V426 Sge была открыта только в 2018 г. при вспышке по типу Z And [91]. При исследовании исторической кривой блеска

была открыта вспышка новой, произошедшая в 1968 г. [92]. В распределении энергии в диапазоне от УФ до ИК вклад аккреционного диска обнаружен не был.

Для поиска фликкер-эффекта у V426 Sge был проведен фотометрический мониторинг 15 августа 2024 в течение 3.8 часов в полосе B на телескопе Цейсс-600 КАС. Быстрой переменности не было обнаружено с точностью 0.009 mag.

2.5.2 Симбиотические новые

RU Vul — симбиотическая новая, вспыхнувшая в 1979 г. Была отнесена к симбиотическим звездам в 1980 г. [93]. Является затменной двойной системой с орбитальным периодом 4897 дней [94]. Холодный компонент системы — долгопериодическая переменная спектрального класса M5.7-M6 [95], у которой изменяется не только блеск, но и скорость потери вещества [96]. Горячим компонентом системы является белый карлик, который еще не находится на кривой охлаждения после вспышки, сейчас его $T_{eff} \approx 10^5$ К и продолжает увеличиваться [95].

Мониторинги RU Vul были получены в 2010 – 2021 гг. на телескопах Цейсс-600 КАС и RC600 (таблица 10). Фликкер-эффект обнаружен не был. Так как наблюдения были получены на разных фазах, отсутствие фликкер-эффекта не может быть вызвано затмением горячего или теплого компонентов. Во время вспышек новых аккреционный диск, даже если он был в системе, разрушается [97]. Отсутствие фликкер-эффекта, вероятно, указывает на то, что у RU Vul прошло еще мало времени после вспышки для образования диска заново. Также из-за большого расстояния между компонентами системы, возможно, что в данной системе происходит аккреция Бонда-Хойла и аккреционный диск не образуется.

V1329 Cyg — симбиотическая новая, вспыхнувшая в 1966 г. [98]. До вспышки кривая блеска системы демонстрировала затмения по типу Алголя, после — переменность стала связана с эффектом отражения [99]. Кроме того в 2011 г. у V1329 Cyg были обнаружены джеты [100], которые наблюдаются лишь у небольшой части симбиотических звезд.

Таблица 10 — Фотометрические мониторинги PU Vul.

Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса	Телескоп
20100722	0.008	3.5	180	<i>B</i>	Цейсс-600
20100723	0.013	3	146	<i>B</i>	Цейсс-600
20120811	0.005	1.4	38	<i>B</i>	Цейсс-600
20160822	0.005	4.7	258	<i>B</i>	Цейсс-600
20190809	0.013	2.5	26	<i>B</i>	Цейсс-600
20190809	0.012	2.5	30	<i>V</i>	Цейсс-600
20190810	0.008	2.5	70	<i>B</i>	Цейсс-600
20190811	0.007	4.4	130	<i>B</i>	Цейсс-600
20210816	0.03	3	178	<i>B</i>	Цейсс-600
20211122	0.008	3	56	<i>U</i>	RC600

Таблица 11 — Фотометрические мониторинги V1329 Cyg.

Дата	Точность, mag	Длительность наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса
20211002	0.05	2.4	132	<i>B</i>
20230824	0.019	3.0	76	<i>B</i>
20240812	0.011	2.0	60	<i>B</i>

Фотометрические наблюдения V1329 Cyg проводились на телескопе Цейсс-600 КАС в 2021-2024 гг. (табл. 11). До вспышки новой у V1329 Cyg наблюдался фликкер-эффект от аккреционного диска [99]. После вспышки в наших наблюдениях быстрая переменность не была зарегистрирована, в литературе также не сообщалось об обнаружении фликкер-эффекта у этой системы.

НМ Sge — симбиотических новая, вспыхнувшая в 1975 г. [101]. Холодным компонентом является мирида, с периодом пульсаций 527 дней. Горячий компонент — белый карлик, с эффективной температурой > 250000 К [102]. Система окружена пылевой оболочкой (относится к D-типу симбиотических звезд). Возможно в НМ Sge присутствуют джеты ([103; 104]), что указывает на существование и аккреционного диска. Однако последние наблюдения в оптическом диапазоне не выявили характерных признаков джетов в структуре окружающей туманности [102].

Для поиска фликкер-эффекта 20 августа 2024 г. был проведен фотометрический мониторинг в полосе B на телескопе Цейсс-600 КАС. Наблюдения длились 2 часа. С точностью 0.008 mag фликкер-эффект обнаружен не был

MWC 603 была отнесена к симбиотическим звездам в 1958 г. [105]. У MWC 603 в отличие от остальных звезд, обсуждаемых в данном разделе, вспышка новой не регистрировалась, но на основе наблюдаемой светимости горячего компонента и оценок скорости потери массы красным гигантом в работе [106] было показано, что в системе недавно произошла вспышка новой и белый карлик в данный момент находится на кривой остывания. 28 августа 2023 г. на телескопе Цейсс-600 КАС был проведен фотометрический мониторинг в полосе B в течение 3.9 часов. Точность составила 0.006 mag. Быстрая переменность не была зарегистрирована.

2.5.3 Повторные симбиотические новые

V407 Cyg — повторная симбиотическая новая, для которой спектр, подтверждающий ее симбиотическую природу был получен только в 1994 г. [107]. Холодный компонент системы — мирида спектрального класса M6–M7 [108]. В работе [109] было показано, что второй компонент системы — белый карлик, который может находиться в трех различных состояниях: в состоянии с очень низким темпом аккреции, в состоянии пропеллера (спокойное состояние) и аккретора (вспышка). Температура горячего компонента во время вспышки меньше, чем в состоянии покоя, как и у классических симбиотических звезд. Также в 2010 г. была открыта вспышка [110], похожая на типичную вспышку классических новых [111]. В этот же день было зарегистрировано гамма-излучение [112], таким образом V407 Cyg стала первой симбиотической звездой, которую наблюдали в гамма-диапазоне.

Во время вспышки 1998 года у V407 Cyg был зарегистрирован фликкер-эффект с амплитудой 0.2^m в V [109]. Он наблюдался до вспышки в 2010 г. [110]. Мониторинги V407 Cyg на телескопе Цейсс-600 проводились с мая 2010 г. (сразу после вспышки) до 2018 г (таблица 12). Фликкер-эффект обнаружен не был. Низкая точность в некоторые даты, составляющая десятые доли звездной величины, связана с уменьшением потока от V407 Cyg, её блеск в полосе B со-

Таблица 12 — Фотометрические мониторинги V407 Cyg.

Дата	Точность, mag	Время наблюдений, часы	Кол. точек	Полоса
20100512	0.02	1.6	51	<i>B</i>
20100724	0.04	3.9	195	<i>B</i>
20110730	0.03	2.8	57	<i>B</i>
20110801	0.03	3.3	57	<i>B</i>
20120809	0.08	4.4	52	<i>B</i>
20120810	0.08	4.7	90	<i>B</i>
20121006	0.06	4	49	<i>B</i>
20130721	0.1	3.7	39	<i>B</i>
20140721	0.02	4	78	<i>B</i>
20140722	0.02	3.8	75	<i>B</i>
20150820	0.1	5	54	<i>B</i>
20160730	0.05	4.9	135	<i>B</i>
20160814	0.03	6.5	126	<i>B</i>
20170811	0.17	3	31	<i>B</i>
20170812	0.2	4.4	128	<i>B</i>
20170813	0.05	4.6	89	<i>V</i>
20180802	0.014	4.7	87	<i>B</i>
20180802	0.005	4.7	86	<i>V</i>
20180803	0.007	3.6	101	<i>B</i>
20180807	0.006	1.3	100	<i>V</i>
20180810	0.008	2.4	67	<i>B</i>

ставлял 18.5^m . Исчезновение фликкер-эффекта у симбиотических звезд после вспышки — характерное явление. Сейчас V407 Cyg возвращается в спокойное состояние и восстановление фликкер-эффекта может занять много лет [113].

2.5.4 Малоизученные симбиотические звезды и кандидаты в симбиотические звезды

В настоящее время существует важная проблема в изучении симбиотических звезд: эволюционные модели предсказывают существование в нашей Галактике от 1 200 до 400 000 [4; 114–116] симбиотических звезд, однако на сегодняшний день подтверждено лишь около 300 таких объектов [117]. Это огромное расхождение объясняется в первую очередь сложностями их обнаружения: эмиссионный спектр у этих звезд часто бывает очень слабым, а иногда совсем исчезает (например, [70], [118], [119]). Поэтому для поиска новых кандидатов необходимы длительные спектральные наблюдения. В последнее время для поиска симбиотических звезд начали активно применять методы машинного обучения, анализируя данные фотометрических и астрометрических каталогов ([2],[120]).

Подтвердить симбиотическую природу звезды можно только по её спектру, в котором должны присутствовать как полосы поглощения красного гиганта, так и эмиссионные линии ионов с высоким потенциалом ионизации, образующиеся в туманности. Но, так как фотометрические наблюдения более доступны, чем спектральные, для выделения из больших списков более вероятных кандидатов в симбиотические звезды, можно использовать фликкер-эффект. Его наличие указывает на существование в системе аккреционного диска.

Для поиска фликкер-эффекта у кандидатов в симбиотические звезды проводились фотометрические мониторинги на Цейсс-600 КАС и на RC600 КГО. У указанных в табл. 13 объектов быстрая переменность не была обнаружена.

Наибольшее количество изучаемых кандидатов было выбрано из статьи [2], в которой авторы по данным обзоров 2MASS, WISE и ASAS-SN выделили красные гиганты, затем из них были выбраны объекты, для которых показатель цвета по данным спутника GALEX $FUV - NUV < 1$, что указывает на присутствие белого карлика в системе. Рассмотрим более подробно некоторых кандидатов в симбиотические звезды.

Для BD-14 450 было получено пять фотометрических мониторингов в 2023 - 2024 гг. Возможно, что у BD-14 450 присутствовал фликкер-эффект 8 февраля 2023 г., но амплитуда переменности была сравнима с ошибками

Таблица 13 — Фотометрические мониторинги кандидатов в симбиотические звезды.

Имя	Дата	Точность, mag	Время набл., часы	Кол. точек	Полоса	Ссылка
2MASS J01090044 +5203369	20241107	0.005	2.0	40	<i>B</i>	[121]
2MASS J18014909 +8139252	20230819	0.003	2.1	43	<i>B</i>	[2]
	20240823	0.005	2.3	68	<i>B</i>	
BD-14 450	20230208	0.003	1.0	20	<i>B</i>	[2]
	20230817	0.006	0.8	25	<i>B</i>	
	20230824	0.008	1.5	85	<i>B</i>	
	20230922	0.003	3.6	371	<i>B</i>	
	20241014	0.007	3.3	95	<i>B</i>	
C 2863	20240825	0.03	1.9	56	<i>B</i>	[2]
DV Aur	20241107	0.007	3.4	96	<i>B</i>	[122]
	20241126	0.010	1.2	36	<i>B</i>	
	20241127	0.009	0.9	30	<i>B</i>	
IRAS 23161+1809	20230818	0.007	2.2	63	<i>B</i>	[2]
GaSS 1-9	20250715	0.016	1.1	20	<i>B</i>	[123]
KO Her	20230820	0.007	2.7	70	<i>B</i>	[2]
Tyc 1521-203-1	20230823	0.008	2.5	128	<i>B</i>	[2]
Tyc 5212-477-1	20240823	0.004	2.0	59	<i>B</i>	[2]
V503 Her	20210927	0.008	1.6	48	<i>B</i>	[124]
V627 Cas	20211001	0.04	3.3	59	<i>B</i>	[125]
	20240817	0.012	1.8	55	<i>B</i>	
	20241015	0.016	5.3	130	<i>B</i>	

наблюдений. После этого быстрая переменность не регистрировалась. На спектрографе ТДС было получено семь спектров BD-14 450: 27 января 2023, 5 февраля 2023, 8 ноября 2023, 4 декабря 2023, 7 февраля 2024 и 21 декабря 2024. Континуум соответствует углеродной звезде, также во всех спектрах присутствуют линии бальмеровской серии водорода до H15, что не характерно для водородных линий, образующихся в атмосферах красных гигантов. Для образования таких линий требуется более разреженная среда и, возможно, эти линии всё-таки образуются в туманности, что указывает на симбиотическую природу BD-14 450. Также линия H α (рис. 2.10) имеет сложный двугорбый профиль, что характерно для симбиотических звезд [126].

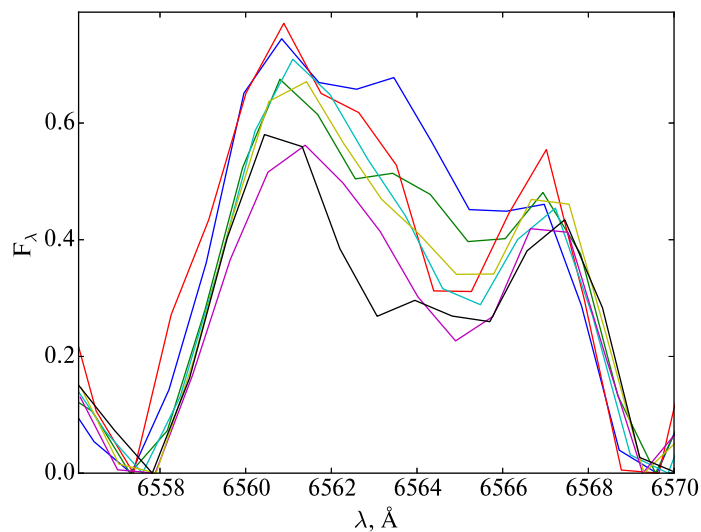


Рисунок 2.10 — Линия H α на спектрах низкого разрешения BD-14 450. Уровень непрерывного спектра соответствует нулевому значению потока. Спектры перед вычитанием были нормированы на значение непрерывного спектра. Синяя линия — спектр, полученный 27.01.2023, зеленая — 05.02.2023, красная — 12.10.2023, голубая — 08.11.2023, фиолетовая — 04.12.2023, желтая — 07.02.2024, черная — 21.12.2024.

Спектры 2MASS J18014909+8139252 были получены 25 января 2023 г. и 1 января 2025 г. В спектрах хорошо видны полосы TiO. Из сопоставления полученных спектров со спектрами из библиотеки [28] был определен спектральный класс красного гиганта — M3. Эмиссионные линии отсутствуют. В спектре 1 января 2025 г. в голубой области присутствует дополнительный компонент, но эмиссионные линии, обычно усиливающиеся в симбиотических системах при повышении аккреции, отсутствуют. Также в августе 2024 г. не был зарегистрирован фликкер-эффект (табл. 13), то есть либо теплый компонент не является

аккреционным диском, либо в августе темп аккреции был еще недостаточным для формирования теплого компонента.

В спектрах остальных кандидатов в симбиотические звезды из статьи [2], указанных в табл. 13, также отсутствуют эмиссионные линии. Спектральные классы красных гигантов следующие: С 2863 — С-звезда, IRAS 23161+1809 — М6.5 III, КО Her — М6.5 III, ТУС 1521-203-1 — М0 III. Возможно, это так называемые «спящие» симбиотические звезды [127], у которых эмиссионный спектр проявляется только при увеличении темпа аккреции (из-за пульсаций красного гиганта или эллиптической орбиты).

Также поиск фликкер-эффекта проводился у симбиотических звезд, которые пока не отнесены ни к одному классу из-за своей малой изученности (табл. 14). Все объекты из таблицы 14, кроме V1261 Ori, наблюдались на спутнике TESS. Анализ полученных на этом спутнике кривых блеска также показал отсутствие у данных симбиотических звезд фликкер-эффекта [35].

У EG And наличие фликкер-эффекта с амплитудой 0.007 mag было заподозрено в работе [78], но в наших наблюдениях и данных TESS быстрая переменность отсутствует.

2.6 Симбиотические звезды с фликкер-эффектом

Далее более подробно рассмотрим симбиотические звезды, у которых мы зарегистрировали фликкер-эффект.

T CrV является одной из немногих повторных симбиотических новых — класса тесных двойных систем, демонстрирующих повторяющиеся вспышки, подобные вспышкам классических новых. За более чем полуторавековую историю наблюдений у T CrV зарегистрировано две такие вспышки (в 1866 и 1946 гг.), в максимуме которых блеск системы достигал значений ярче 2 mag [128]. Система состоит из красного гиганта спектрального класса М4 III [129] и аккрецирующего белого карлика. Высокая светимость компонента-гиганта определяет сравнительно небольшую амплитуду вспышек (~ 8 mag) по сравнению с классическими новыми, однако сам механизм явления идентичен: термоядерный взрыв на поверхности белого карлика, вызванный критическим накоплением вещества от звезды-донора.

Таблица 14 — Фотометрические мониторинги малоизученных симбиотических звезд.

Имя	Дата	Точность, mag	Время набл., ч.	Кол. точек	Полоса	Телескоп
EG And	20241010	0.003	4.2	944	<i>B</i>	Цейсс-600
ER Del	20230823	0.0027	2.0	113	<i>B</i>	Цейсс-600
GH Gem	20211215	0.006	2.5	41	<i>U</i>	NBI, 2.5-м
	20241220	0.014	1.3	39	<i>B</i>	Цейсс-600
LAMOST J122804.90 -014825.7	20220305	0.0014	3	77	<i>B</i>	NBI, 2.5-м
QW Sge	20240822	0.008	2.0	110	<i>B</i>	Цейсс-600
StHa 63	20241206	0.012	2.2	62	<i>B</i>	Цейсс-600
	20241223	0.06	1.8	32	<i>U</i>	Цейсс-600
StHa 190	20210913	0.004	2.5	71	<i>B</i>	Цейсс-600
UV Aur	20241103	0.003	4.0	212	<i>B</i>	Цейсс-600
V471 Per	20210929	0.011	1.4	38	<i>B</i>	Цейсс-600
	20241103	0.020	1.6	87	<i>B</i>	Цейсс-600
V1261 Ori	20241206	0.004	2.6	78	<i>B</i>	Цейсс-600

В настоящее время T CrB находится в предвспышечном состоянии [130]. В 2015 году система T CrB перешла в так называемое сверхактивное состояние [131; 132]. У нее более чем в 10 раз вырос поток в линиях бальмеровской серии водорода, появились интенсивные эмиссионные линии He I и He II, на одну звездную величину увеличился средний уровень блеска в полосе *B*. Данная стадия активности продолжалась вплоть до середины 2023 года [133], при этом пик активности пришелся на апрель 2016 года [132]. Изучение T CrB в преддверии ожидаемой вспышки представляет особый интерес для понимания процессов, происходящих при вспышках новых.

Фликкер-эффект у T CrB был зарегистрирован нами во все даты наблюдений в период 2013–2025 гг. (таблица 15). На рис. 2.11 приведены все кривые блеска в одинаковом масштабе по осям. Согласно литературным данным, при начале сверхактивного состояния амплитуда фликкер-эффекта уменьшилась [131]. По нашим данным, значительного изменения амплитуды не

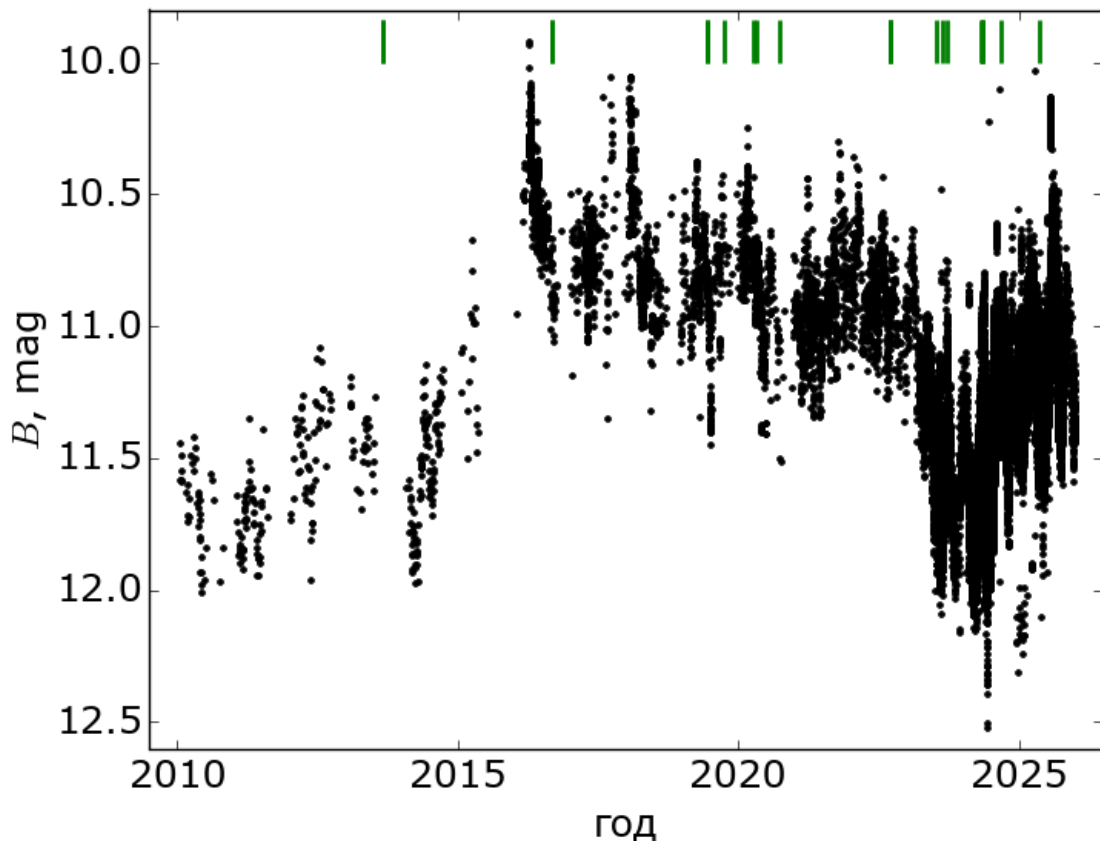


Рисунок 2.11 — Кривая блеска Т СгВ в полосе B по данным AAVSO. Зелеными вертикальными линиями отмечены моменты получения мониторингов

зафиксировано. Однако в спокойном состоянии было получено лишь несколько мониторингов в близкие даты, поэтому не исключено, что в среднем амплитуда фликкер-эффекта была выше.

Во время минимума в предвспышечный период, продолжавшегося с июня–июля 2023 г. по июнь–июль 2024 г., амплитуда быстрой переменности снизилась в три раза (таблица 15 и рис. 2.12). Спектральные данные и наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне указывают на уменьшение вклада аккреционного диска в общее излучение системы, что свидетельствует о падении темпа аккреции [133].

После возвращения блеска системы летом 2024 г. к уровню, соответствующему сверхактивному состоянию, темп аккреции вновь возрос, вклад аккреционного диска в спектральное распределение энергии увеличился, а амплитуда фликкер-эффекта вернулась к значениям, наблюдавшимся до минимума (таблица 15 и рис. 2.12).

Таким образом, после начала сверхактивного состояния амплитуда фликкер-эффекта стала пропорциональна величине потока излучения в голубой области спектра, основной вклад в которой вносит аккреционный диск. Это

Таблица 15 – Фотометрические мониторинги Т СгВ.

Дата	Ампли- туда, mag	Точ- ность, mag	Время набл., часы	Кол. точек	Полоса	Телескоп
20130724	0.08	0.018	3.0	176	<i>B</i>	Цейсс-600
20130725	0.15	0.023	3.5	190	<i>B</i>	Цейсс-600
20130726	0.11	0.012	3.3	92	<i>B</i>	Цейсс-600
20160731	0.13	0.022	2.2	152	<i>B</i>	Цейсс-600
20160801	0.05	0.015	1.4	119	<i>B</i>	Цейсс-600
20190513	0.11	0.008	3.3	835	<i>B</i>	Цейсс-600
20190514	0.13	0.006	3.0	454	<i>B</i>	Цейсс-600
20190829	0.26	0.008	2.8	150	<i>U</i>	RC600
20200310	0.05	0.014	2.3	45	<i>U</i>	Цейсс-600
20200322	0.18	0.011	2.3	128	<i>U</i>	RC600
20200825	0.20	0.010	2.1	352	<i>B</i>	RC600
20220814	0.07	0.006	2.1	71	<i>B</i>	Цейсс-600
20220816	0.10	0.008	2.3	134	<i>B</i>	Цейсс-600
20220819	0.10	0.010	2.7	150	<i>B</i>	Цейсс-600
20230608	0.07	0.009	2.3	348	<i>B</i>	RC600
20230817	0.04	0.007	2.5	73	<i>B</i>	Цейсс-600
20240331	0.03	0.005	2.9	468	<i>B</i>	RC600
20240410	0.04	0.007	3.9	114	<i>B</i>	Цейсс-600
20240411	0.03	0.004	4.4	124	<i>B</i>	Цейсс-600
20240412	0.03	0.003	5.2	161	<i>B</i>	Цейсс-600
20240810	0.19	0.019	2.1	61	<i>B</i>	Цейсс-600
20250418	0.11	0.021	2.2	757	<i>B</i>	RC600 КАС

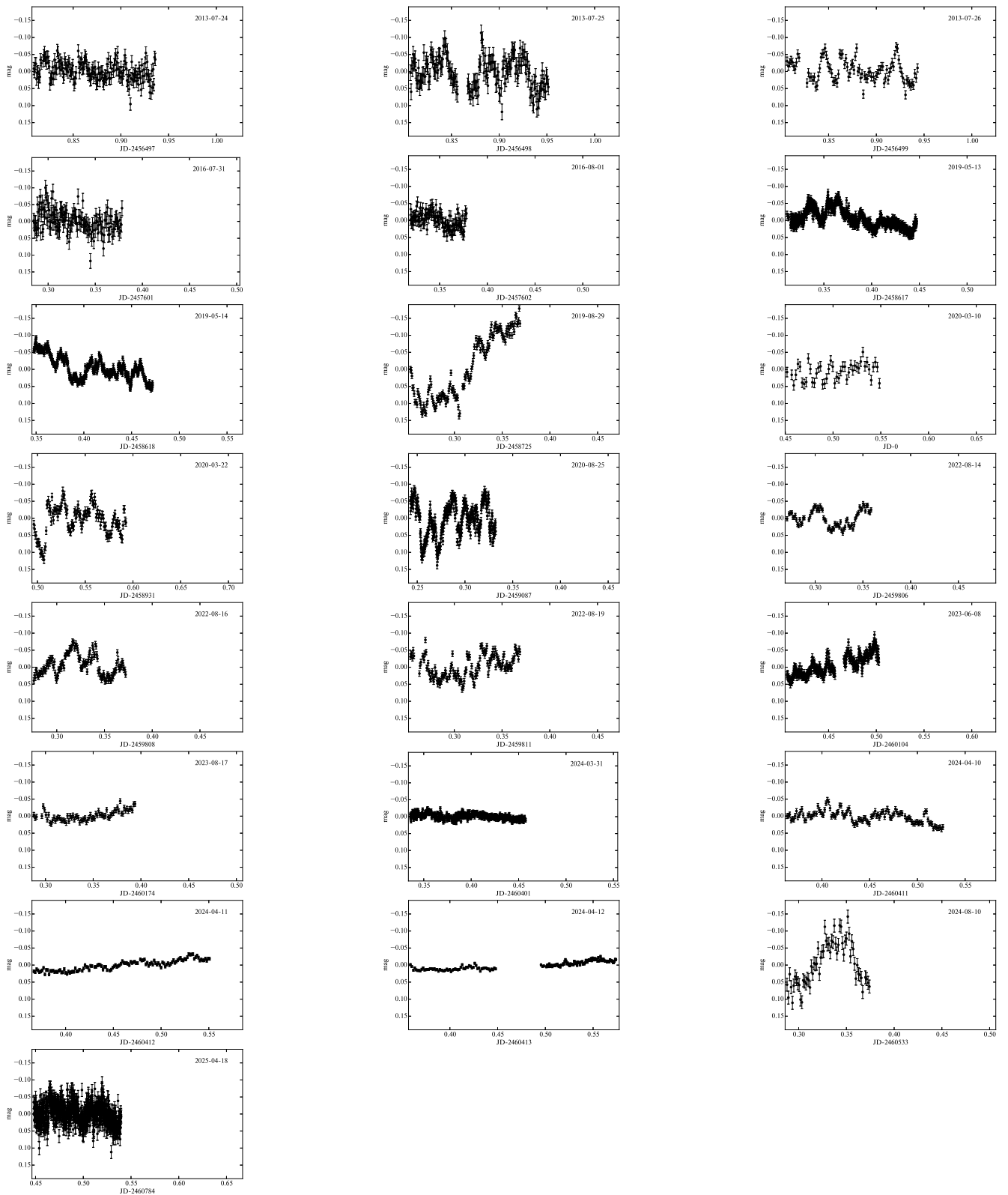


Рисунок 2.12 — Кривые блеска T CrB

указывает на изменения в области аккреционного диска, в которой образуется быстрая переменность.

SN Cyg — одна из наиболее хорошо изученных (и одна из наиболее пекулярных) симбиотических звезд. Система состоит из красного гиганта спек-

Таблица 16 — Фотометрические мониторинги СН Суг.

Дата	Амплитуда, mag	Точность, mag	Время набл., часы	Кол. точек	Полоса	Телескоп
20120805	нет	0.005	2.5	393	<i>B</i>	Цейсс-600
20130819	0.11	0.007	3.6	800	<i>B</i>	Цейсс-600
20160731	нет	0.006	2.8	128	<i>B</i>	Цейсс-600
20160731	0.04	0.006	2.6	119	<i>U</i>	Цейсс-600
20160815	0.18	0.009	6.6	191	<i>U</i>	Цейсс-600
20160816	0.13	0.013	4.7	102	<i>B</i>	Цейсс-600
20160816	0.18	0.009	6.6	156	<i>U</i>	Цейсс-600
20160817	0.20	0.010	6.4	164	<i>B</i>	Цейсс-600
20160817	0.28	0.012	5.7	131	<i>U</i>	Цейсс-600
20160818	0.15	0.013	7.3	165	<i>B</i>	Цейсс-600
20160818	0.25	0.010	7.3	165	<i>U</i>	Цейсс-600
20191106	0.05	0.005	2.2	468	<i>B</i>	RC600
20240813	нет	0.016	3.5	345	<i>B</i>	Цейсс-600
20241008	нет	0.019	3.7	502	<i>B</i>	Цейсс-600
20241106	нет	0.018	1.8	458	<i>B</i>	Цейсс-600
20241223	нет	0.018	0.8	279	<i>B</i>	Цейсс-600
20250716	нет	0.004	3.3	608	<i>B</i>	Цейсс-600

трального класса М6–М7 и белого карлика. В системе наблюдается 2 периода (750 дней и 15.6 лет) изменений лучевой скорости и блеска, но их природа до конца не известна. Хинкель и др. [134] предложили модель, в которой СН Суг — тройная система, состоящая из симбиотической звезды с орбитальным периодом 750 дней, вокруг которой обращается G–K карлик с периодом 15.6 лет. Другая модель СН Суг [135], предложенная этими же авторами позднее, — двойная система с орбитальным периодом 15.6 лет и нерадиальными пульсациями красного гиганта с периодом 750 дней. СН Суг относится к небольшой группе симбиотических звезд, у которых наблюдаются джеты [136].

Фотометрические мониторинги СН Суг были получены в 2012–2025 гг (таблица 16). Кривые блеска, построенные в одинаковом масштабе по осям, представлены на рис. 2.13. Также для анализа присутствия пыли в системе

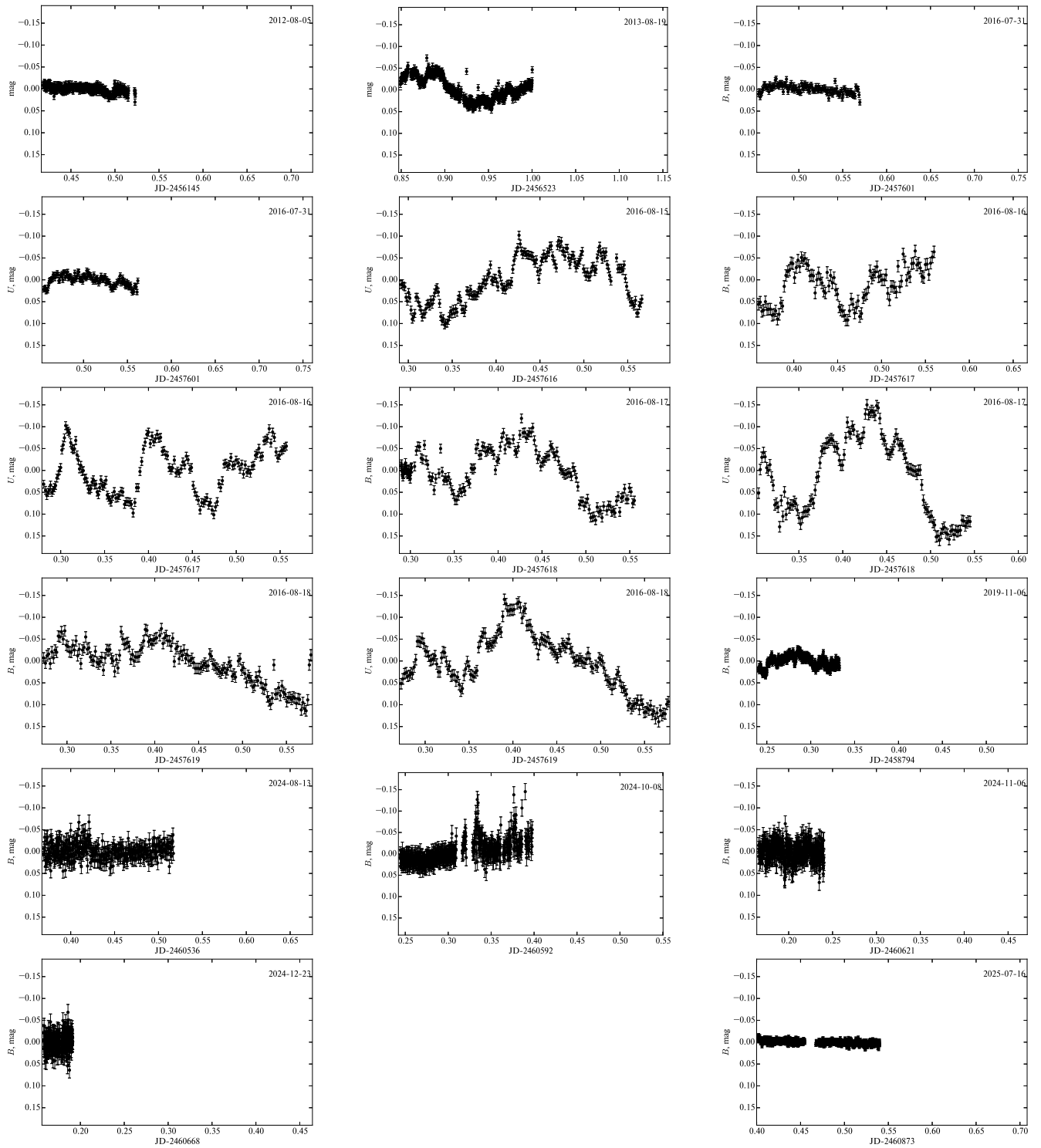


Рисунок 2.13 — Кривые блеска SN Cyg

были проанализированы ИК наблюдения, полученные В.И. Шенавриным в 1994–2025 г. на 1.25-м телескопе ЗТЭ с использованием одноканального InSb-фотометра [44] и в 2025 г. на 2.5-м телескопе КГО на LMP камере [45].

Как сообщается в работе [137], по данным космического телескопа Kepler, фликкер-эффект у SN Cyg исчез в январе 2010 года. Это совпало с началом падения блеска звезды (рис. 2.14), повторяющегося с периодом около 15.6 лет.

Интересно, что на кривой блеска в инфракрасной полосе M в период 2006 – 2010 гг. наблюдалось увеличение потока, что можно связать с выбросом и последующим остыванием пыли в системе.

Блеск звезды в оптическом (в полосе V) и ближнем ИК (в полосе J) диапазоне восстановился к февралю 2012 года, но фликкер-эффект в это время обнаружен не был [138]. Впервые он был зарегистрирован 19 августа 2013 г. (таблица 16, рис. 2.13) с небольшой для СН Cyg амплитудой. После этого быстрая переменность с амплитудой ~ 0.2 mag наблюдалась до 2019 г., а в следующих наблюдениях в 2024 г. фликкер-эффект отсутствовал. На кривой блеска в полосе V наблюдается минимум в 2023 г., но отсутствие ИК-наблюдений в эти даты не позволяет сделать однозначных выводов о наличии пыли в системе. На присутствие пыли косвенно указывает увеличение потока в полосе M в 2025 г.

Таким образом, природа исчезновения фликкер-эффекта до конца не ясна. Скорее всего, исчезновение быстрой переменности связано с эпизодами пылеобразования (зарегистрированными в 2006–2010 гг. и, возможно, в 2023 г.). Также исчезновение фликкер-эффекта может быть вызвано затмением горячего компонента [134] или нарушением внутренней структуры диска при уменьшении темпа аккреции [138].

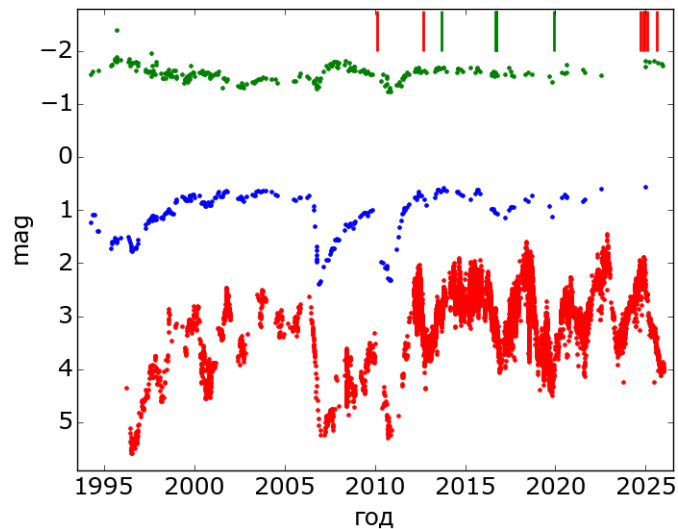


Рисунок 2.14 — Кривая блеска СН Cyg в полосах V (красные точки, кривая блеска сдвинута на константу) по данным AAVSO, J (синие точки) и M (зеленые точки) по данным В.И. Шенаврина (устное сообщение). Зелеными вертикальными линиями отмечены моменты получения мониторингов, когда фликкер-эффект был зарегистрирован, красными — когда не был зарегистрирован. Первая красная линия — момент наблюдения системы космическим телескопом Кеплер.

Таблица 17 — Фотометрические мониторинги SU Lyn.

Дата	Амплитуда, mag	Точность, mag	Время набл., часы	Кол. точек	Полоса	Телескоп
20230225	нет	0.005	2.5	393	<i>U</i>	RC600
20241109	нет	0.005	2.4	105	<i>B</i>	Цейсс-600
20251225	0.38	0.017	10.5	240	<i>U</i>	Цейсс-600

Ещё одной симбиотической звездой с фликкер-эффектом является SU Lyn. Впервые она была классифицирована как кандидат в симбиотические звезды в 2016 г. [127] на основании обнаружения сильного рентгеновского излучения и переменности в ультрафиолетовом диапазоне. Окончательное подтверждение её симбиотической природы было получено в 2021 г. [139] с открытием в УФ-спектре эмиссионных линий с высокими потенциалами ионизации.

Впервые фликкер-эффект у SU Lyn был зарегистрирован [140] в полосе *U* в 2020 г. с амплитудой 0.03-0.11 mag. Однако в 2021 г. он обнаружен не был. В 2022 г. наблюдалась короткая вспышка активности: в марте фликкер появился с небольшой амплитудой (0.03^m), но уже в апреле исчез. По данным спутника TESS быстрая переменность у SU Lyn отсутствовала 24.12.2019–20.01.2020 и 23.12.2022–18.01.2023.

Нами наблюдения SU Lyn проводились в 2023–2025 гг. (табл. 17). В 2023 и 2024 гг. фликкер-эффект зарегистрирован не был. Однако в 2025 г. был обнаружен фликкер-эффект с большой амплитудой 0.38 mag в полосе *U*. По спектрам, полученным на ТДС, видно, что в спектре 2 марта 2025 г. по сравнению со спектром 3 февраля 2024 г. появилась линия $H\alpha$. Появление эмиссионных линий в спектре и фликкер-эффекта указывает на возникновение в системе аккреционного диска.

Объект DQ Ser входит в число симбиотических звезд, остающихся на сегодняшний день мало изученными. В Общем каталоге переменных звезд (ОКПЗ-5.1) [141] DQ Ser обозначена как малоизученная медленная неправильная переменная (тип L). Диапазон изменений блеска, согласно каталогу, составляет от 13.9 до 16.0 mag.

Таблица 18 — Фотометрические мониторинги DQ Ser.

Дата	Амплитуда, mag	Точность, mag	Время набл., часы	Кол. точек	Полоса	Телескоп
20211001		0.06	2.0	39	<i>B</i>	Цейсс-600
20211021	0.04	0.010	2.1	41	<i>B</i>	RC600
20211027	0.05	0.007	2.0	40	<i>B</i>	RC600
20230819	нет	0.015	3.9	71	<i>B</i>	Цейсс-600
20240814	нет	0.014	3.9	79	<i>B</i>	Цейсс-600

Фотометрические мониторинги DQ Ser проводились в полосе *B* на двух инструментах (табл. 18): 1 октября 2021 г. и в 2023–2024 гг. — на телескопе Цейсс-600 КАС ГАИШ МГУ, а 21 и 27 октября 2021 г. — на телескопе RC600 КГО ГАИШ МГУ.

Данные, полученные в ходе мониторинга 1 октября 2021 г., позволили заподозрить наличие быстрой переменности блеска. Однако точность измерений оказалась недостаточной для надежного определения ее параметров. Обработка результатов наблюдений (рис. 2.15) показала, что амплитуда переменности 21 октября 2021 г. составила 0.04 mag, 27 октября 2021 г. — 0.05 mag.

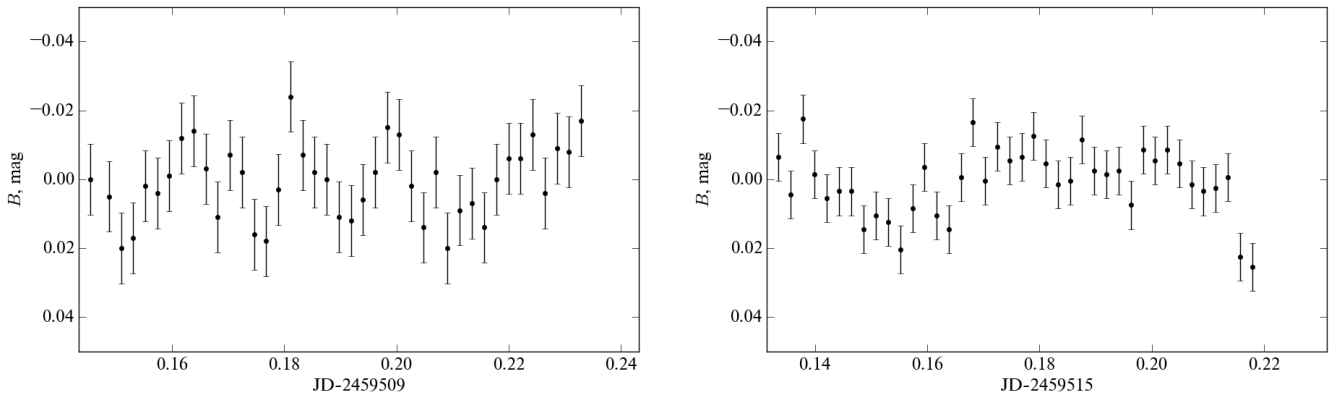


Рисунок 2.15 — Кривые блеска в полосе *B* DQ Ser по данным мониторингов, полученных 21.10.2021 (слева) и 27.10.2021 (справа)

В 2023–2024 гг. быстрая переменность в полосе *B* у DQ Ser не была зарегистрирована при точности фотометрии ~ 0.015 mag.

* * *

Таким образом, для поиска и изучения фликкер-эффекта мы наблюдали 30 симбиотических звезд и 12 кандидатов в симбиотические звезды, из

них фликкер-эффект был зарегистрирован у четырех систем: T CrB, CN Cyg, SU Lyn и DQ Ser, причем у DQ Ser — впервые.

При изучении быстрой переменности у симбиотических звезд нет устоявшейся методики выделения фликкер-эффекта. Часто наличие быстрой переменности определяется просто по виду кривых блеска или с помощью критериев, основанных на сравнении амплитуды изменений кривой блеска изучаемого объекта и контрольной звезды. За амплитуду принимают стандартное отклонение кривой блеска, разницу между максимальным и минимальным значением или разницу между средним максимальным и средним минимальным значением. Нами была разработана методика определения наличия быстрой переменности по периодограмме Ломба-Скаргла и графику вейвлет-коэффициентов. У объекта наблюдается фликкер-эффект, если есть пики для которых вероятность ложной тревоги $< 0.0006\%$ (5σ). Затем его наличие уточнялось по вейвлет-преобразованию.

Классические симбиотические звезды — самый многочисленный класс, мы получили кривые блеска 11 систем, у всех изучаемых нами классических симбиотических звезд фликкер-эффект не был зарегистрирован. У Z And наблюдается быстрая переменность, обусловленная вращением белого карлика с сильным магнитным полем (такую переменность тоже иногда относят к быстрой переменности блеска у симбиотических звезд). Период изменения блеска (~ 30 минут) и амплитуда (0.005 mag), измеренные нами, соответствуют данным из литературы, но для надежного выделения этого сигнала необходимы длительные мониторинги (часы или десятки дней), так как при коротких наблюдениях (около 2 часов) амплитуда сравнима с ошибками фотометрии. V1413 Aql — необычная классическая симбиотическая звезда, постоянно находящаяся в активном состоянии, в спектре которой присутствует теплый компонент (возможно, аккреционный диск), однако в многолетних наземных наблюдениях (включая периоды между вспышками и во время вспышек 2010, 2020 и 2025 годов) фликкер-эффект зарегистрирован не был. Сообщение о фликкер-эффекте по данным TESS может быть связано с загрязнением излучением звезды-соседки и не имеет независимых подтверждений. Отсутствие быстрой переменности объясняется либо наблюдением аккреционного диска с ребра (когда внутренние области не видны), либо тем, что теплый компонент на самом деле является псевдофотосферой вокруг горячего компонента. У затменных классических симбиотических звезд AX Per, YY Her, BF Cyg быстрая переменность не заре-

гистрирована нами. Также как и в случае V1413 Aql это возможно связано с наблюдением систем с ребра. В случае BF Cyg аккреционный диск может быть разрушен сильным магнитным полем белого карлика. В ходе наблюдений симбиотической звезды StHa 169 фликкер-эффект не был обнаружен. Отсутствие быстрой переменности в сочетании с подтвержденными пульсациями красного гиганта с периодом 34 дня делает эту систему удобным объектом для изучения переменности холодного компонента, однако инфракрасный мониторинг также не выявил его короткопериодических колебаний на уровне выше 0.005 mag. AG Peg и V426 Sge — симбиотические звезды, у которых наблюдаются два типа вспышек (как у новых и как у классических симбиотических звезд), что делает их важными объектами для понимания физических процессов, происходящих в симбиотических звездах. В наших наблюдениях фликкер-эффект не обнаружен ни у одной из систем, хотя у AG Peg он был зарегистрирован в УФ и рентгене [90] (что указывает либо на разные области формирования фликкер-эффекта в разных диапазонах, либо на высокую температуру аккреционного диска).

У четырех симбиотических новых (PU Vul, V1329 Cyg, HM Sge, MWC 603) и симбиотической повторной новой V407 Cyg фликкер-эффект в наших наблюдениях не был обнаружен. Вспышка новой разрушает аккреционный диск, его повторное формирование требует очень длительного времени (нескольких десятилетий). Таким образом, обнаружение фликкер-эффекта у этих систем в будущем позволит оценить время, необходимое для формирования аккреционного диска после вспышек новых.

Фликкер-эффект у известной симбиотической повторной новой T CrB был зарегистрирован во все даты наблюдений в период 2013-2025 гг. У T CrB ожидается вспышка в ближайшее время. В 2015 г. система перешла в сверхактивное состояние, которое продлилось до мая-июня 2023 г., затем наблюдался минимум блеска и летом 2024 г. уровень блеска система вернулась к уровню в сверхактивном состоянии. При переходе системы из спокойного состояния в сверхактивное в наших наблюдениях амплитуда фликкер-эффекта не изменилась и составляла $\sim 0.1 - 0.2$ mag. В минимуме блеска амплитуда фликкер-эффекта сильно упала и составляла $\sim 0.03 - 0.04$ mag, что связано с падением темпа аккреции. После окончания минимума амплитуда фликкер-эффекта возросла до значений, наблюдавшихся в сверхактивном состоянии.

SN Cyg — одна из наиболее изученных симбиотических звезд, у которой наблюдается два периода изменения блеска (750 дней и 15.6 лет), природа ко-

торых остается не до конца понятной (тройная система или двойная система и пульсации гиганта). Фликкер-эффект у SN Sng периодически исчезает. По данным телескопа Kepler быстрая переменность блеска исчезла в январе 2010 года, совпав с началом падения блеска, повторяющегося с периодом 15.6 лет. В это же время в 2006–2010 гг. было зарегистрировано увеличение потока в ИК-диапазоне, что указывает на выброс пыли. Затем фликкер-эффект вновь наблюдался в 2013–2019 гг., а к 2024 году снова пропал. Исчезновение быстрой переменности, скорее всего, связано с эпизодами выбросов пыли в системе, но также может объясняться затмением горячего компонента или нарушением внутренней структуры аккреционного диска при снижении темпа аккреции.

SU Lyn является представителем недавно выделенного класса симбиотических звезд, так называемых «спящих» симбиотических звезд. Спектры этих систем в оптическом диапазоне обычно ничем не отличаются от спектров одиночных красных гигантов, эмиссионные линии появляются на короткое время при увеличении темпа аккреции. Фликкер-эффект регистрировался в 2020, 2022 и 2025 г. Появление фликкер-эффекта в 2025 году, возникновение эмиссионной линии $H\alpha$ и увеличение потока в коротковолновой области в спектре SU Lyn, указывает на формирование аккреционного диска в системе.

Симбиотическая звезда DQ Ser — одна из малоизученных симбиотических звезд. Наблюдения 21 и 27 октября 2021 г. показали у нее наличие переменности с амплитудой 0.04–0.05 mag. Фликкер-эффект у этой системы был зарегистрирован нами впервые.

Глава 3. Спектральный фликкер-эффект

Глава основана на работах 2, 3 из списка публикаций по теме диссертации.

Традиционным подходом к исследованию быстрой переменности симбиотических звезд являются фотометрические мониторинги в коротковолновой области спектра. В настоящее время в мире спектральные исследования фликкер-эффекта носят ограниченный характер и проведены лишь для четырех объектов: CN Cyg, RS Oph, MWC 560 и T CrB, у которых амплитуда быстрой переменности одна из наибольших. Несмотря на фотометрическое сходство фликкер-эффекта в этих системах, его спектральное проявление различно. В CN Cyg быстрая переменность была зарегистрирована в линиях бальмеровской серии [142]; в RS Oph фликкер-эффект проявлялся только в линии He II при неизменности бальмеровских линий [143]; в MWC 560 быстрой переменности в линиях не было выявлено вовсе [144]. Для T CrB было показано, что вариации профиля H α обусловлены процессами во внешних областях аккреционного диска, однако из-за отсутствия одновременного фотометрического мониторинга прямая связь этой переменности с фотометрическим фликкер-эффектом осталась не установленной [145].

Таким образом, в основном у фликкер-эффекта у симбиотических звезд изучены фотометрические характеристики. Спектральные исследования быстрой переменности проведены только для узкой выборки объектов и демонстрирует неоднозначные зависимости между фотометрическим фликкер-эффектом и переменностью в линиях.

3.1 Спектральные наблюдения

Спектральные наблюдения симбиотических звезд были выполнены на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ с Транзиентным Двухлучевым Спектрографом (ТДС) в 2020 – 2026 гг.: рабочая ширина щели — 1" (при спектрофотометрических наблюдениях использовалась щель шириной 10"), диапазон длин волн 3600 – 7500 Å, разрешающая сила в коротковолновом канале (3600 – 5770 Å)

$R = 1300$, в длинноволновом ($5670 - 7500 \text{ \AA}$) $R = 2500$ [39]. Для увеличения эффективности в ТДС свет разделяется на синий ($3600 - 5770 \text{ \AA}$) и красный ($5670 - 7500 \text{ \AA}$) каналы при помощи дихроичного делителя. Дисперсоры (голографические решетки с объемной фазовой решеткой), объективы камер и сами ПЗС-камеры (Andor Newton 940P, формата 512x2048) оптимизированы под диапазоны пропускания каналов. Также предусмотрен отдельный калибровочный блок на основе интегрирующей сферы и плоского зеркала для переброса света от источников непрерывного и линейчатого спектра на щель, а также возможность щелевого ПЗС-подмотра.

Полученные на ТДС спектры были обработаны по методике, описанной в работе [40]. Спектры калибровались с помощью линейчатого спектра газоразрядной Ne–Kr–Pb-лампы с полым катодом (HCL), поправки на виньетирование и неравномерность ширины щели вычислялись по лампе с непрерывным спектром (спектральное «плоское поле»). Теллурическими стандартами служили звезды A0V, наблюдавшиеся на близких высотах к объекту перед мониторингом и сразу после него. В случаях, когда воздушная масса объекта существенно менялась в ходе наблюдений, дополнительно наблюдался еще один стандарт в середине мониторинга. При калибровке спектры стандарта приводились к воздушной массе объекта на момент регистрации каждого спектра. Для минимизации атмосферной дисперсии щель располагалась вертикально. Все спектры были приведены к барицентру Солнечной системы.

Для учета влияния на спектр объекта облаков и положения звезды в щели были проведены дополнительные исследования. Были получены спектры стандарта HR4963 с $1''$ щелью при различной облачности (рис. 3.1 а). Отношение минимального и максимального (т.е. полученного без облаков) спектров представлены на рис. 3.1 б. Можно увидеть, что облака «серые», т.е. даже при ослаблении потока в 1.5 раза они не влияют на распределение энергии в спектре объекта с точностью до 1%.

Звезда во время мониторинга может смещаться поперек щели из-за неточного ведения телескопа (до декабря 2021 г. были проблемы с автогидированием). Для проверки изменений спектра при движении объекта поперек щели были получены спектры стандарта BD+75d325 с $1''$ щелью, когда он находится в центре щели, когда центр изображения стандарта находился на краю щели (расстояние между центрами щели и изображения объекта примерно равно $0.5''$) и вне щели (расстояние составляет $1''$) (рис. 3.2 а). Качество изображения было около

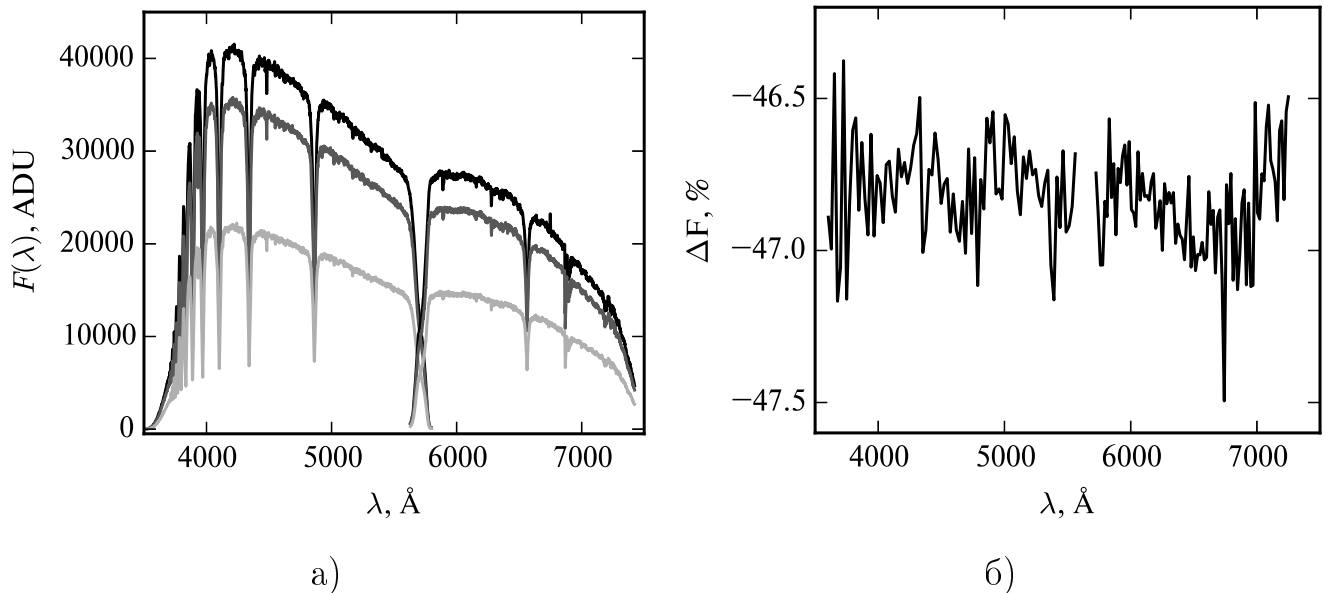


Рисунок 3.1 — Спектры HR4963, полученные при разной облачности (а). Относительные изменения спектров, полученных при минимальном и максимальном поглощении (б).

1.8". При нахождении объекта не в центре щели поток падает. поэтому спектры были домножены на константу, чтобы они совпадали в центре канала, затем из каждого спектра был вычтен спектр, полученный, когда центры объекта и щели совпадали. На рис. 3.2б представлено отношение спектров, когда звезда была на краю щели и когда звезда находилась в центре щели. При попадании объекта на край щели вклад синей области спектра увеличивается, так как изображение объекта имеет более красное ядро и синие крылья из-за рассеяния в атмосфере. Искажения происходят монотонно в рабочем диапазоне спектрографа, поэтому влияют на линию и континуум рядом одинаково.

После получения одномерных спектров методика обработки спектральных мониторингов следующая:

1. Вариации размера изображения звезды на щели, ошибки ведения телескопа и переменность прозрачности атмосферы приводят к изменениям регистрируемого потока из-за переменных потерь света на узкой щели. Поскольку вычисление абсолютных потоков невозможно, мы искали эффекты быстрой переменности в эквивалентных ширинах эмиссионных линий. Во время спектрального мониторинга на небе могут присутствовать облака или изменяться прозрачность атмосферы. Как было показано выше, в диапазоне чувствительности спектрографа ТДС облака являются серыми: можно считать, что распределение энергии

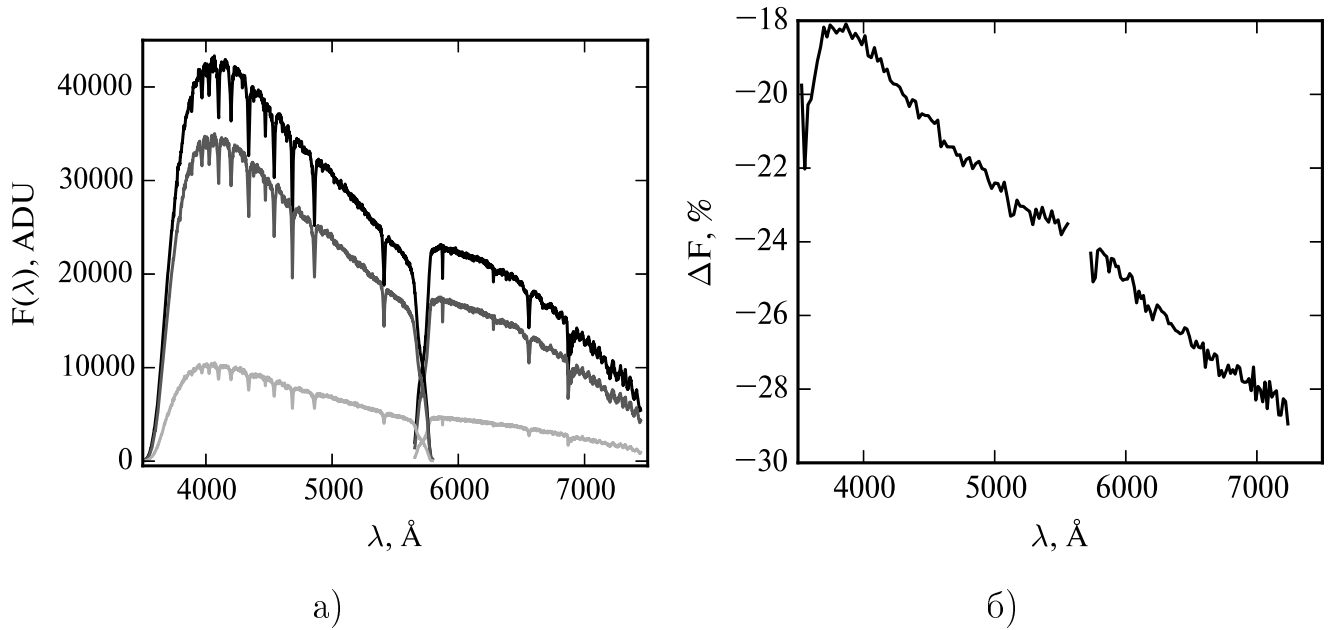


Рисунок 3.2 — Спектры BD+75d325, полученные при разном положении объекта в щели (верхняя линия — звезда в центре щели, средняя линия — звезда смещена на $0.5''$, нижняя линия — центр звезды находился вне щели на расстоянии $1''$ от ее центра)(а). Разность между верхним и средним спектрами (б).

Качество изображения составляло $1.8''$, ширина щели $1''$.

в спектре объекта при наблюдении через облака не изменяется, только уменьшается поток. Для исправления поглощения полученные спектры умножались на константу, значение которой в R-канале выбиралось так, чтобы спектры совпадали в диапазоне $7400\text{--}7440 \text{ \AA}$. В этом диапазоне вклад туманности, горячего компонента и аккреционного диска мал, а поток от красного гиганта, вклад которого наибольший на данных длинах волн, считался постоянным в течение мониторинга. В В-канале нельзя пренебрегать изменением потока от системы в течение мониторинга, поэтому для исправления поглощения выбирались наиболее близкие по времени спектры в R-канале, затем спектры в В-канале умножались на соответствующие константы, полученные для спектров в R-канале.

2. Затем по всем нормированным спектрам, полученным в течение мониторинга, был посчитан медианный спектр.
3. Так как в В-канале заметен вклад излучения аккреционного диска в континуум, то при фликкер-эффекте континуум тоже может меняться, причем не обязательно синхронно с линиями. Для учета изменения континуума медианный спектр сдвигался на константу так, чтобы его

Таблица 19 — Спектральные и спектрофотометрический мониторинги Т СгВ.

Дата	Спектральный канал	Экспозиции, кол-во × сек	Время часы	Щель, "
20200825	В-канал	17 × 100	2.2	1
	В-канал	31 × 150		
	Р-канал	142 × 30		
20200906	В-канал	54 × 100	2.1	10
	Р-канал	128 × 30		
20230608	В-канал	67 × 100	2.3	1
	Р-канал	153 × 30		
20240426	В-канал	62 × 100	3.0	1
	Р-канал	139 × 30		

континуум совпадал с континуумом одиночного спектра рядом с линией.

- После этого из одиночного спектра вычитался медианный. Разность делилась на поток в линии в медианном спектре. Поток в континууме и около бальмеровского скачка определялся как медиана потока в диапазоне длин волн шириной около 50 Å. Ошибки оценивались как стандартное отклонение от нуля шести аналогичных интегралов с той же длиной диапазона интегрирования, взятых слева и справа от линии.

3.2 Спектральные и спектрофотометрический мониторинги Т СгВ

Для симбиотической звезды Т СгВ было проведено 3 спектральных мониторинга (с 1" щелью) и 1 спектрофотометрический мониторинг (с 10" щелью). Журнал наблюдений представлен в таблице 19. Одновременно со спектральными мониторингами 25 августа 2020 г. и 8 июня 2023 г. были проведены фотометрические мониторинги в полосе *B* на телескопе RC600 КГО (табл. 15).

На рис. 3.3 представлены исправленные за межзвездное покраснение спектры ТСгВ. В них хорошо видны полосы поглощения TiO и линия Ca I λ 4227. Также хорошо заметны эмиссионные линии бальмеровской серии водорода, He I

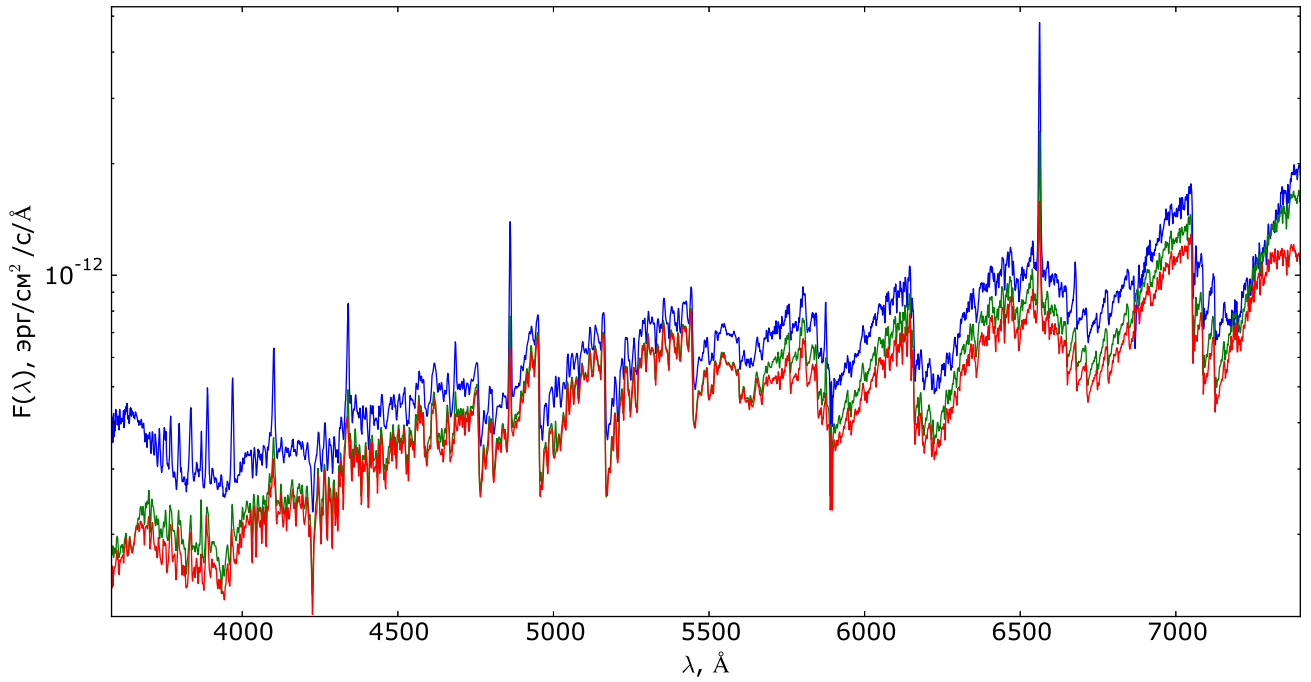


Рисунок 3.3 — Исправленные за межзвездное покраснение наблюдаемые спектры Т СгВ, полученные 25 августа 2020 г. (синяя линия), 8 июня 2023 г. (зеленая линия) и 26 апреля 2024 г. (красная линия).

и He II и [Ne III]. Потоки в линиях в 2020 г. больше, чем в 2023-2024 гг., когда у Т СгВ наблюдалось падение блеска перед возможной очередной вспышкой новой.

Рассмотрим спектральный мониторинг, полученный 25 августа 2020 г. Для поиска фликкер-эффекта мы проанализировали потоки в линиях H α , H β , He I λ 5875.6, He II λ 4686 и [NeIII] λ 3869. Полученные графики изменения потоков в линиях представлены на рис. 3.4. Фликкер-эффект был зарегистрирован во всех изучаемых линиях, кроме [NeIII]. Отсутствие быстрой переменности в данной линии подтверждает, что были учтены все эффекты, которые могли вызвать ложное обнаружение фликкер-эффекта. Так как эта запрещенная линия образуется в протяженной разреженной внешней части туманности, то у нее не должно наблюдаться быстрой переменной. В таблице 20 указаны амплитуды переменности.

Анализ кривых блеска (рис. 3.4) в фильтре *B* и линиях выявил их схожую форму, но с наличием временного сдвига. Для оценки задержек были посчитаны коэффициенты корреляции между кривыми блеска (рис. 3.5). Для учета ошибок определения потоков на коэффициенты корреляции были смоделированы различные кривые блеска методом Монте-Карло (10^6 реализаций). Установлено, что фликкер-эффект в полосе *B* опережает изменения потока в линии H α

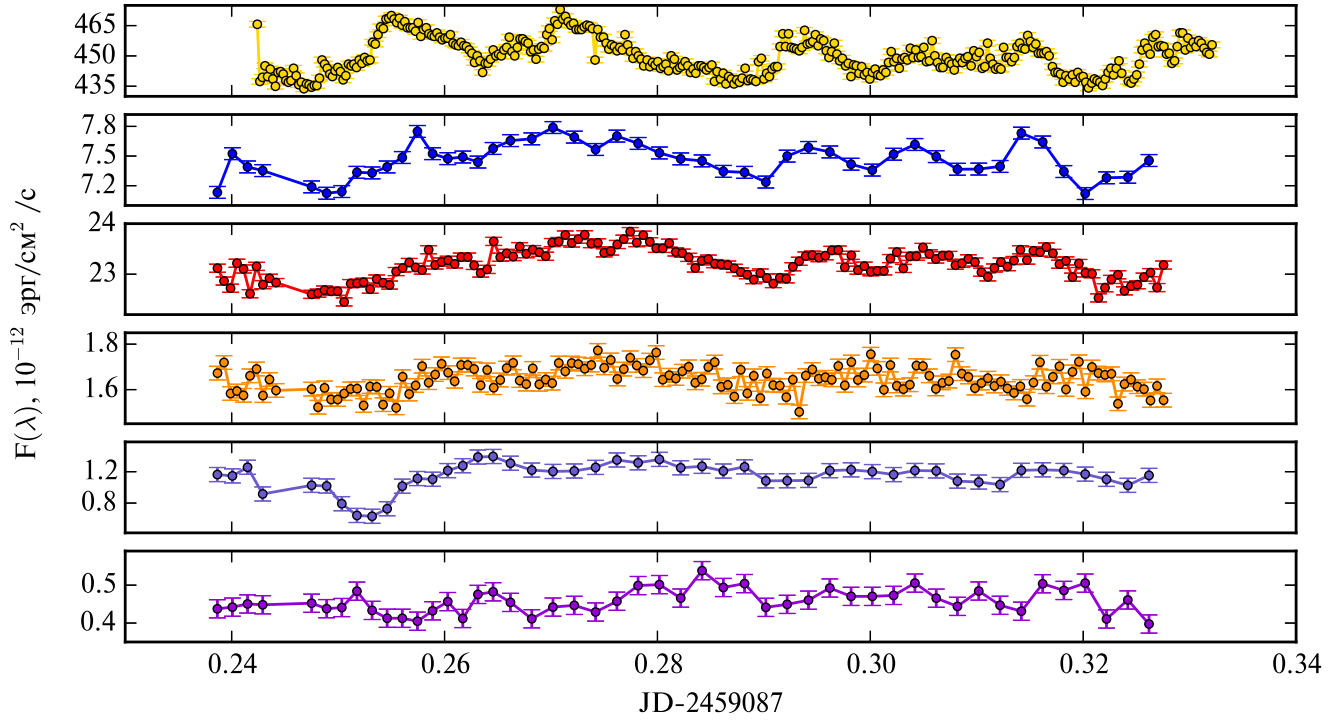


Рисунок 3.4 — Кривые изменения потоков Т CrB (сверху вниз) в полосе B и в линиях $H\beta$, $H\alpha$, He I $\lambda 5875.6$, He II $\lambda 4685.7$ и $[\text{Ne III}]$ в течение спектрального мониторинга 25 августа 2020 г.

Таблица 20 — Амплитуды фликкер-эффекта Т CrB, измеренные 25 августа 2020 г.

Линия	Амплитуда, %
$H\alpha$	6
He I ($\lambda 5875.6$)	16
$H\beta$	9
He II ($\lambda 4686$)	63
Полоса B	9

на 228 ± 28 с, в линии He I (5875.6 \AA) — на 500 ± 70 с, и в линии He II (4686 \AA) — на 595 ± 28 с. Изменения в линии H β происходят синхронно с полосой B (коэффициент корреляции ~ 0.6). Однако, амплитуда переменности в H β (и других более слабых линиях в синей части спектра) недостаточна для объяснения полной амплитуды фликкер-эффекта в полосе B , что указывает на наличие дополнительного переменного источника в континууме, которым, по-видимому, является аккреционный диск.

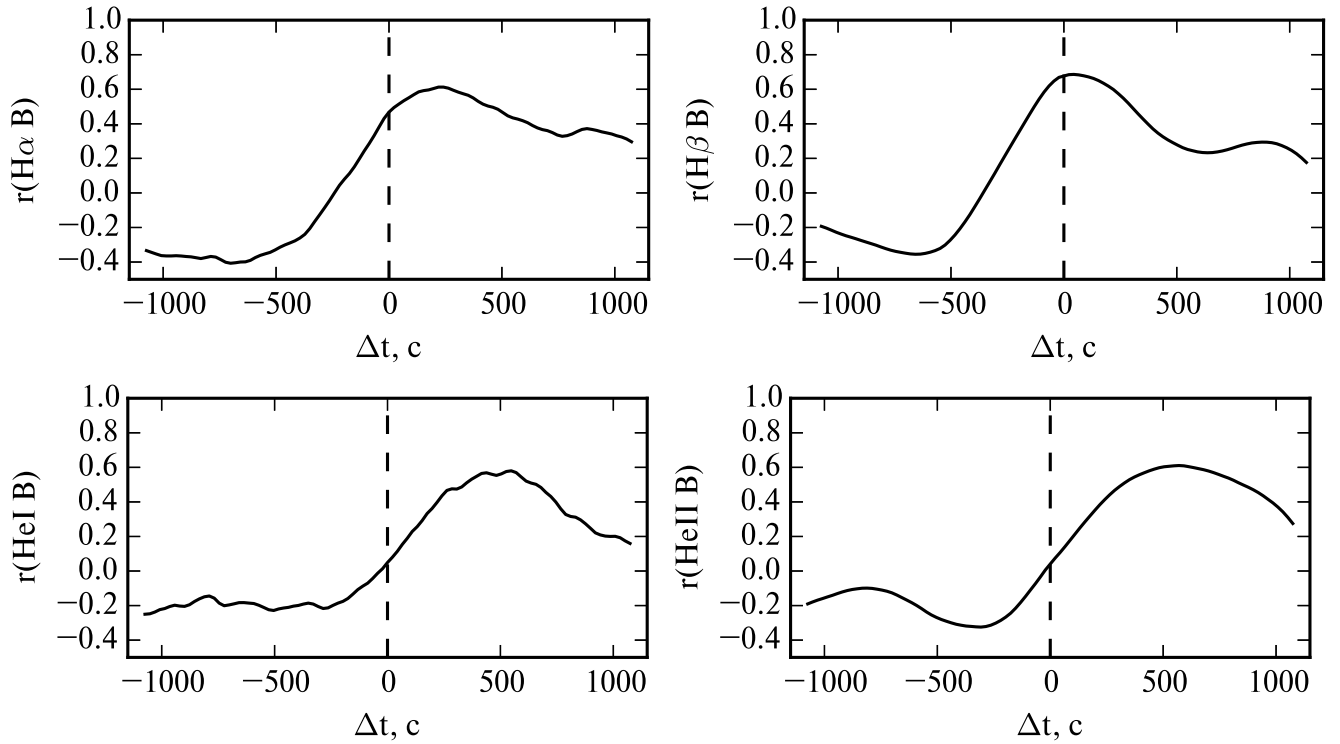


Рисунок 3.5 — Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений T CrB 25 августа 2020 г.

Спектрофотометрический мониторинг T CrB, выполненный 6 сентября 2020 г., проводился при фотометрической погоде: с высокой прозрачностью атмосферы и стабильным качеством изображений (вариации потока в красной области спектра не превышали 1%). Вследствие использования широкой щели ($10''$), ширина профилей линий определялась относительно низким качеством изображения ($2.4''$). Это позволило надежно исследовать переменность потоков только в ярких линиях H α и H β ; остальные линии были слишком слабы для анализа фликкер-эффекта. В то же время, благодаря стабильной прозрачности атмосферы, удалось изучить переменность потока в области бальмеровского скачка ($\lambda 3600\text{--}3650 \text{ \AA}$), что недоступно при спектральном мониторинге.

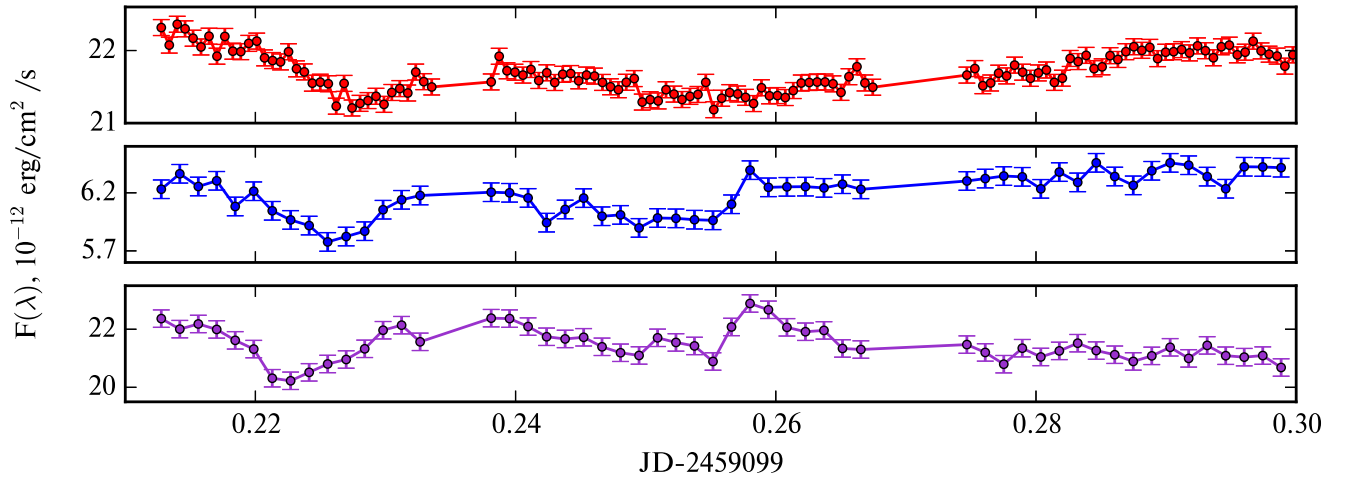


Рисунок 3.6 — Кривые изменения потоков (сверху вниз) в линиях $H\alpha$, $H\beta$ и в диапазоне длин волн λ 3600 - 3650 Å в течение спектрофотометрического мониторинга 06 сентября 2020 г.

Таблица 21 — Амплитуды фликкер-эффекта, измеренные 06 сентября 2020 г.

Линия	Амплитуда, %
$H\alpha$	5
$H\beta$	11
λ 3600 - 3650 Å	12

Полученные кривые блеска (рис. 3.6) похожи по форме, но наблюдается временной сдвиг, величина которого возрастает с увеличением длины волны. Амплитуды переменности представлены в табл. 21. На кривой блеска в ультрафиолетовой области зафиксировано кратковременное увеличение потока, которое отсутствует в линии $H\alpha$. Корреляционный анализ (рис. 3.7) показывает высокие значения коэффициентов корреляции; максимумы достигаются при сдвигах относительно линии $H\beta$: для $H\alpha$ — $+296 \pm 88$ с, что примерно соответствует полученной ранее величине, и для континуума (λ 3600–3650 Å) — -130 ± 120 с.

Следующий спектральный мониторинг был получен 8 июня 2023 г., когда у Т CrВ началось падение блеска, которое, возможно, связано с очередной вспышкой повторной новой (рис. 2.11). Потоки в эмиссионных линиях стали меньше, чем в 2020 г, остались хорошо видны только линии бальмеровской серии водорода и не изменился поток в линии $[\text{Ne III}]$, линии He I и He II

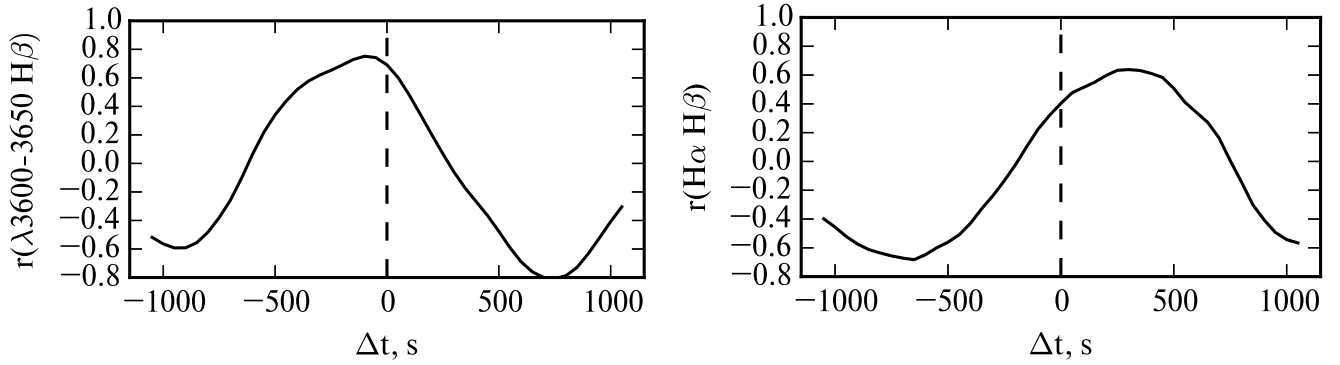


Рисунок 3.7 — Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений T CrB 6 сентября 2020 г.

практически исчезли, также сильно упал континуум в голубой области спектра (рис. 3.3). Для изучения быстрой переменности были выбраны $H\alpha$, $H\beta$, He II $\lambda 4686$ и $[Ne III] \lambda 3869$. Также одновременно со спектральным мониторингом был проведен фотометрический мониторинг в полосе B на телескопе RC600 КГО. Кривые блеска представлены на рис. 3.8.

Фликкер-эффект был зарегистрирован в линиях $H\alpha$, $H\beta$, He II $\lambda 4686$ и в полосе B . Амплитуды быстрой переменности представлены в табл. 22. Кривые блеска в линиях $H\alpha$ и $H\beta$ имеют похожую форму, коэффициент корреляции достигает 0.6. В отличие от наблюдений, полученных в 2020 г., временные задержки между этими линиями не были зарегистрированы (рис. 3.9). Коэффициент корреляции между $H\beta$ и B составляет примерно 0.3, что гораздо меньше, чем в 2020 г. и появилась задержка по времени около 300 с (рис. 3.9). Амплитуда переменности в линии He II значительно больше амплитуды фликкер-эффекта в линиях бальмеровской серии водорода, по сравнению с 2020 г. она выросла, примерно, в 2 раза. Вид кривой блеска в He II сильно отличается от кривой блеска в полосе B и в линиях бальмеровской серии водорода. Возможно, это связано с тем, что переменность в He II отслеживает другую область формирования фликкер-эффекта в аккреционном диске.

Рассмотрим спектральный мониторинг, полученный 26 апреля 2024 г. в середине минимума перед возможной вспышкой (рис. 2.11). Эмиссионный спектр стал слабее, чем был 8 июня 2023 г (рис. 3.3). Переменность исследовалась в линиях $H\alpha$, $H\beta$, He I $\lambda 5875.6$, He II $\lambda 4686$ и $[Ne III] \lambda 3869$. Фликкер-эффект, как и в прошлые даты, был зарегистрирован во всех линиях, кроме $[Ne III]$. Амплитуда переменности указана в табл. 23. По сравнению с наблюдениями 2023 г. амплитуда фликкер-эффекта в линиях $H\alpha$ и $H\beta$ и He II — выросла.

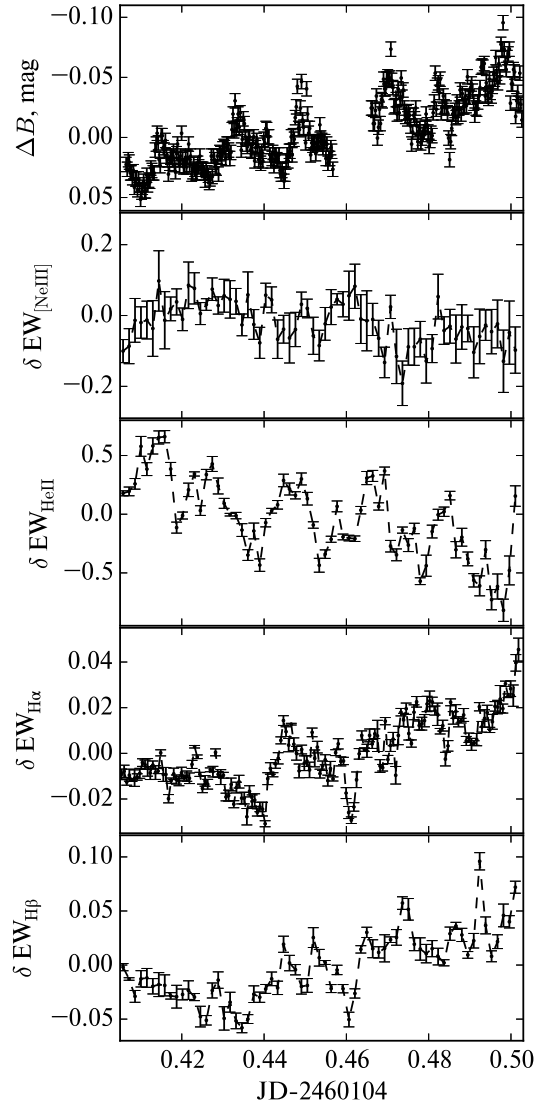


Рисунок 3.8 — Кривая блеска в полосе B (верхний график) и кривые изменения эквивалентной ширины линий (сверху вниз) $H\beta$, $H\alpha$, $\text{He II } \lambda 4686$ и $[\text{Ne III}] \lambda 3869$ в течение спектрального мониторинга 08 июня 2023 г.

Таблица 22 — Амплитуды фликкер-эффекта, измеренные 08 июня 2023 г.

Линия	Амплитуда, %
$H\alpha$	9
$H\beta$	13
$\text{He II } \lambda 4686$	122
Полоса B	14

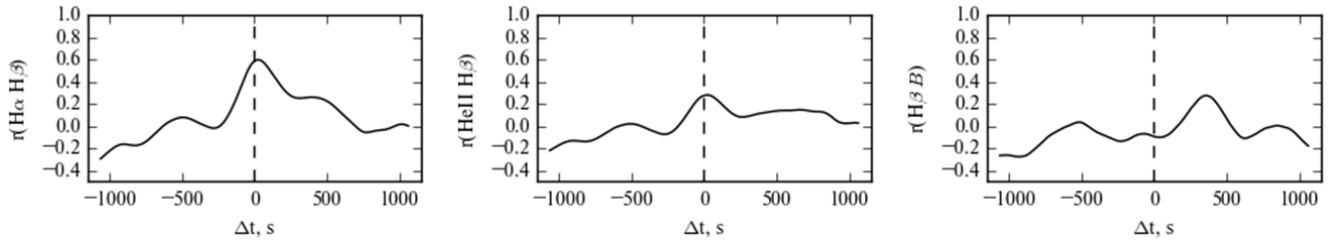


Рисунок 3.9 — Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений T CrB 8 июня 2023 г.

Таблица 23 — Амплитуды фликкер-эффекта, измеренные 26 апреля 2024 г.

Линия	Амплитуда, %
H α	29
H β	35
He I λ 5875.6	53
He II λ 4686	154

Кривые блеска в линиях похожи: коэффициент корреляции Пирсона (рис. 3.10) для H α H β \sim 0.5, He I H β — \sim 0.3, He II H β — \sim 0.6. Также, как и в 2020 г., стали наблюдаться задержки по времени: по сравнению с H β переменность в H α запаздывает на 70 с, в He I — на 180 с, в He II — опережает на 60 с.

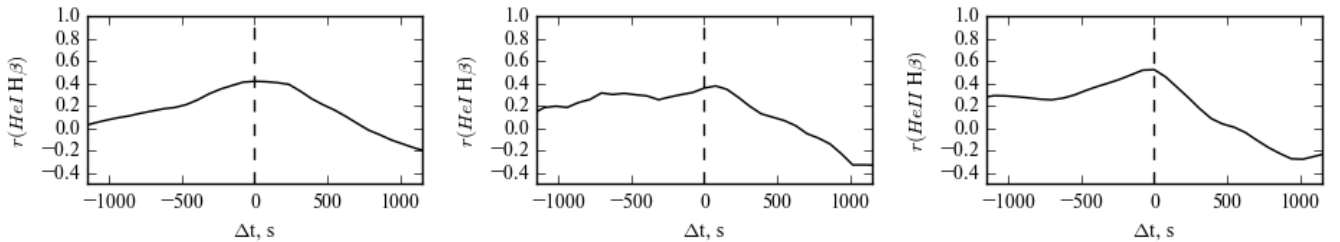


Рисунок 3.10 — Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений T CrB 26 апреля 2024 г.

Анализ кривых блеска выявил наличие временной задержки между изменениями потоков в различных линиях. Данный вывод подтверждается анализом временных рядов, выполненного с использованием модернизированного метода ICCF [146; 147], стандартно применяемого при эхо-картировании активных ядер галактик. Обнаруженные задержки, вероятно, обусловлены сложным строением туманности в симбиотической системе. Ионизирующие фотоны излучаются

как горячим компонентом, так и внутренними областями аккреционного диска, в то время как вещество в туманности поступает от холодного компонента системы.

С учетом полной массы системы Т CrB составляющей порядка $2 M_{\odot}$ [148], расчетная большая полуось орбиты составляет 1 а. е., что соответствует ~ 450 световым секундам. В рамках указанных орбитальных масштабов и с учетом погрешностей измерений обнаруженные временные задержки не противоречат масштабам системы.

Обнаруженная нами значительная переменность потока в линии He II $\lambda 4686$ у Т CrB ранее уже наблюдалась у другого объекта — повторной симбиотической новой RS Oph [143]. В случае RS Oph поток менялся в 4 раза, при характерном времени изменений порядка четырех минут. Существенное различие амплитуд вариаций в линиях бальмеровской серии и He II, а также наличие временной задержки между ними, вероятно, обусловлены разницей в расстояниях от источника ионизации (белый карлик и внутренние области аккреционного диска) до областей формирования этих линий, а также различиями в оптической глубине соответствующих областей.

3.3 Спектральный мониторинг Y Gem

Y Gem — долгое время считалась звездой асимптотической ветви гигантов, у которой наблюдается сильное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение [149]. Вскоре был обнаружен фликкер-эффект в УФ и рентгеновском диапазонах [150; 151], что указывает на существование в системе аккреционного диска. Но природа звезды-компаньона оставалась дискуссионной. Авторы в [152], основываясь на величине ультрафиолетового избытка, относительно низкой скорости истечения и отсутствии узких эмиссионных линий в оптическом диапазоне, характерных для симбиотических звезд (таких как H I, He II и [O III]), склонялись к тому, что горячим компонентом является звезда главной последовательности. В то же время рентгеновские и ультрафиолетовые свойства Y Gem позволили предположить, что этот объект на самом деле является симбиотической звездой [153]. Окончательно Y Gem была отнесена к симбиотическим звездам только в 2024 г [154].

Таблица 24 — Амплитуды фликкер-эффекта в линиях в спектрах Υ Gem, измеренные 17 января 2024 г.

Линия	Амплитуда, %
H α	6
H β	26
He I λ 5875.6	84

Спектральный мониторинг Υ Gem был проведен 17 января 2024 г. В течение 3.4 часов было получено 88 кадров с экспозицией 115 с в В-канале, 238 кадров с экспозицией 40 с в R-канале.

В спектре Υ Gem (рис. 3.11) хорошо видны молекулярные полосы TiO красного гиганта и эмиссионные линии туманности: бальмеровские линии водорода, линии He I, [Ne III]. Фликкер-эффект изучался в линиях H α , H β , He I λ 5875.6 и [Ne III] λ 3869. Во всех линиях, кроме [Ne III] была зарегистрирована быстрая переменность с амплитудами, указанными в табл. 24. В линии He I амплитуда значительно больше, чем в линиях бальмеровской серии, как и у T CrB.

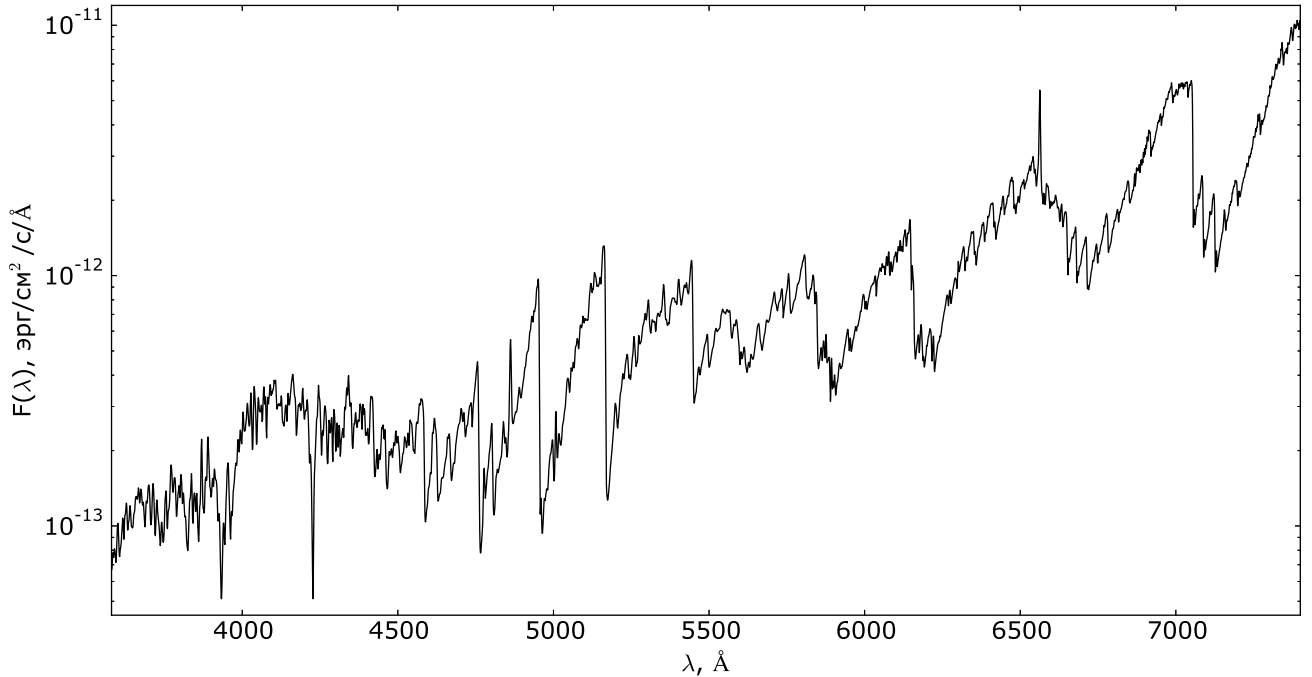


Рисунок 3.11 — Спектр Υ Gem, полученный 17 января 2024 г.

Для кривых изменения потока в ранних линиях были посчитаны коэффициенты корреляции Пирсона (рис. 3.12). Эти кривые имеют похожую форму (коэффициенты корреляции > 0.6). Изменение потоков в линиях He I и H β происходит синхронно, в линии H α — опаздывает по сравнению с ними на ~ 600 с.

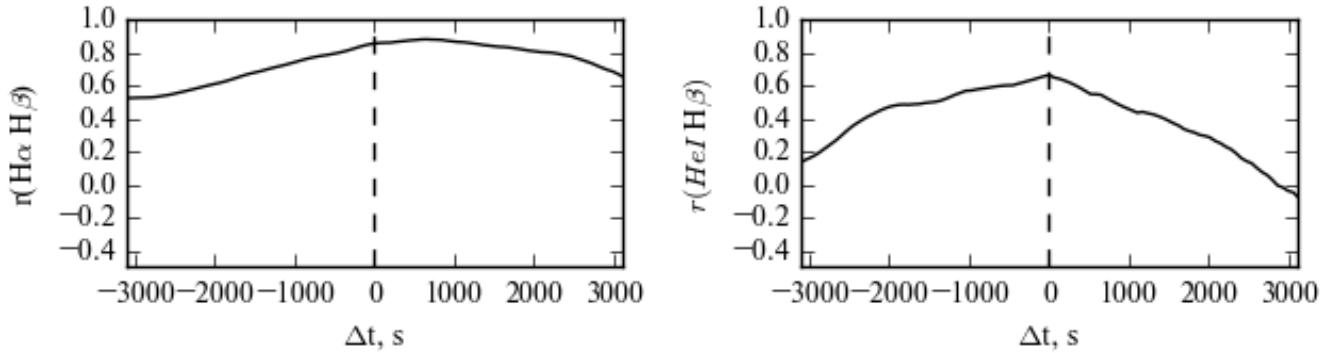


Рисунок 3.12 — Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений Y Gem 17 января 2024 г.

Также, как и в случае T CrB, запаздывание может быть связано со сложной структурой туманности, в которой области с разным бальмеровским декрементом находятся на разном расстоянии от источника фликкер-эффекта (внутренних областей аккреционного диска).

3.4 Спектральные мониторинги LAMOST J122804.90-014825.7 и Миры

Фликкер-эффект, скорее всего, образуется во внутренних областях аккреционного диска. Если наклонение системы близко к 90° , то мы не видим этих областей и поэтому не можем зарегистрировать быструю переменность при фотометрических наблюдениях. Как было показано в разделе 3.2 переменности потоков в линиях связаны с фотометрическим фликкер-эффектом и имеют большую амплитуду переменности, особенно в линиях He I и He II. Поэтому в системах, которые видны с ребра или у которых амплитуда фликкер-эффекта слишком маленькая для регистрации при наземных фотометрических наблюдениях, можно обнаружить быструю переменность в спектральных линиях.

Для поиска фликкер-эффекта у симбиотических звезд, у которых он не был зарегистрирован при фотометрических наблюдениях, был проведен спектральный мониторинг малоизученной симбиотической звезды

Таблица 25 — Спектральные мониторинги LAMOST J122804.90-014825.7 и Миры.

Имя	Дата	Канал	Экспозиции, кол-во × сек	Время, часы	Щель, "
LAMOST J122804.90-014825.7	20220104	В-канал	47 × 130	2.0	1
		Р-канал	47 × 130		
Мира	20240124	В-канал	60 × 80	1.96	1
		Р-канал	126 × 30		

LAMOST J122804.90-014825.7 (журнал наблюдений приведен в табл. 25). В наших фотометрических наблюдениях этот объект не демонстрировал быструю переменность (табл. 14).

Быстрая переменность у LAMOST J122804.90-014825.7 исследовалась в линиях H α , H β , He I λ 5875.6, He I λ 6680, He II λ 4686, NIII λ 4511 и [Ne III] λ 3869 (рис. 3.13). Спектральной быстрой переменности в этих линиях не было зарегистрировано (точности указаны в таблице 26). То есть, у LAMOST J122804.90-014825.7 отсутствие фотометрического фликкер-эффекта связано не с наблюдением системы с ребра, а, скорее всего, с отсутствием в системе аккреционного диска, то есть в ней происходит аккреция Бонди-Хойла.

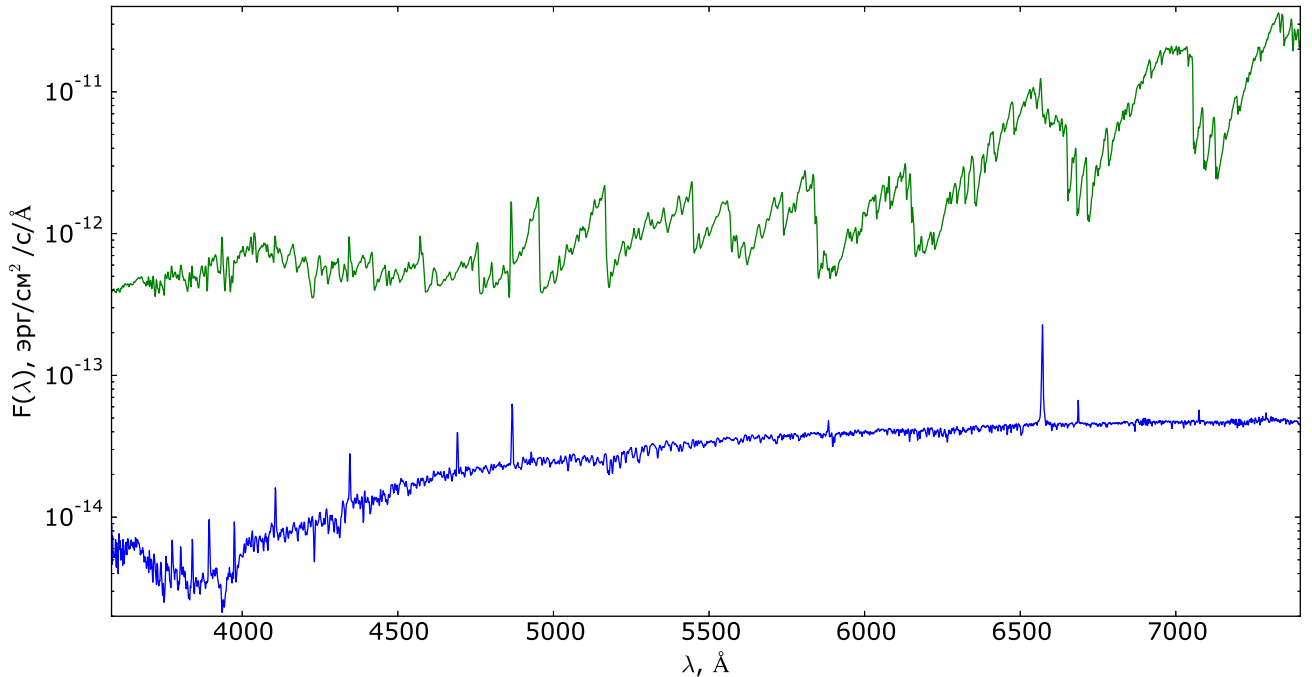


Рисунок 3.13 — Спектры LAMOST J122804.90-014825.7 (синяя линия, получен 4 января 2022 г.), и Миры (зеленая линия, получен 24 января 2024 г.)

Таблица 26 — Точность определения переменности потоков у различных линий в спектральных мониторингах LAMOST J122804.90-014825.7 и Миры.

Имя объекта	Линия	Точность
LAMOST J122804.90-014825.7	H α	0.006
	H β	0.025
	He I λ 5875.6	0.05
	He I λ 6680	0.05
	He II λ 4686	0.04
	NIII λ 4511	0.05
	[Ne III] λ 3869	0.25
Мира	H α	0.006
	He I λ 5875.6	0.03
	H β	0.09
	[Ne III] λ 3869	0.3

Мира — является одной из самых наблюдаемых звезд, но ее симбиотическая природа была подтверждена только в 2010 г. [155]. Мира является одной из небольшого числа симбиотических звезд, у которых наблюдался фотометрический фликкер-эффект [156]. Для нее был получен спектральный мониторинг 24 января 2024 г. (табл. 25). Изучались потоки в линиях H α , H β , He I λ 5875.6 и [Ne III] λ 3869 (рис. 3.13). Спектральной переменности не было зарегистрировано с точностями, указанными в таблице 26.

* * *

Таким образом, спектральный фликкер-эффект наблюдался у двух звезд T CrB и Y Gem, у которых фликкер-эффект был зарегистрирован фотометрически. У Миры наблюдалась быстрая переменность, но из-за отсутствия фотометрического мониторинга одновременно со спектральным или в близкие даты, нельзя уверенно утверждать, что у нее отсутствует быстрая переменность линий при существовании фотометрического фликкер-эффекта.

Было показано, что переменность в спектральных линиях связана с переменностью в континууме, которая наблюдается при фотометрических наблюдениях. Переменность в линиях He I и He II имеет значительно большую

амплитуду, чем переменность в линиях бальмеровской серии. Возможно, это связано с более близким расположением областей образования линий He I и He II к источнику фликкер-эффекта, чем областей формирования линий бальмеровской серии водорода, и различной оптической глубиной в соответствующих линиях. Задержки по времени в кривых блеска фликкер-эффекта могут помочь понять геометрию туманности, распределение областей с различным бальмеровским декрементом внутри системы.

Глава 4. Новые симбиотические звезды

Глава основана на работах 1, 5, 7 из списка публикаций по теме диссертации.

На данный момент существует проблема несоответствия известного количества симбиотических звезд (около 300 [2]) теоретическим предсказанием (3000 – 30000 [3; 4]). До конца 20 века симбиотические звезды в основном открывались случайно: при спектральных обзорах ярких звезд поздних спектральных классов у некоторых находили эмиссионные линии ионов с высокими потенциалами ионизации, или при вспышке звезды после получения ее спектра. С 80-х годов 20 века симбиотические звезды стали открывать по избытку в ультрафиолетовом или рентгеновском диапазоне [2; 151; 152; 157] по сравнению с оптическим или инфракрасным излучением в этой системе. Симбиотические звезды очень сложны для выделения в обзорах. В красной и инфракрасной области они выглядят как обычные одиночные красные гиганты, а ультрафиолетовое излучение было зарегистрировано при обзорах только у ярких звезд. Также симбиотические звезды могут находиться в так называемом «спящем состоянии», когда у них не наблюдаются линии ионов с высокими потенциалами ионизации, и они выглядят как одиночные красные гиганты [2].

Единственная линия, присутствующая в спектрах только у симбиотических звезд, — рамановская линия [O VI] $\lambda 6825$. На основе этой линии был предложен метод поиска симбиотических звезд — проект RAMSES II [158], в котором на телескопах Gemini были проведены наблюдения в двух узкополосных фильтрах, один из которых центрирован на рамановскую линию [O VI], а другой — на континуум с близкой длиной волны. При вычитании изображений, полученных в данных фильтрах, на снимке остаются симбиотические звезды, а звезды, не имеющие рамановской линии, пропадают. Это один из немногих методов, который может находить симбиотические звезды по фотометрическим данным с очень высокой точностью. Но телескопы Gemini очень востребованы астрономами всего мира для различных задач, поэтому они не могут вести обзоры неба только по данной программе, и, к сожалению, пока этот метод применяется только в тестовом режиме в течение небольшого количества наблюдательного времени. В настоящее время несколько научных групп [2; 159] разрабатывают алгоритмы с использованием машинного обуче-

ния для нахождения симбиотических звезд по фотометрическим обзорам [2; 120; 159]. Сейчас в основном именно эти методы позволяют выделить наибольшее количество кандидатов в симбиотические звезды, но, к сожалению, они менее точны. Подтвердить симбиотическую природу кандидата можно только спектральными наблюдениями, при которых видны как полосы поглощения красного гиганта, так и линии ионов с высоким потенциалом ионизации, образованные в туманности.

4.1 CSS 1102

CSS 1102 до сих пор считалась одиночной S-звездой (подтип S-*3e)[160], была включена в Общий каталог галактических S-звезд [161]. С июня 2020 года рассматривается как кандидат в симбиотические звезды, так как у нее были найдены указания на возможное существование фликкер-эффекта, хотя показатели цвета указывали на принадлежность CSS 1102 к красным гигантам.

Фотометрические наблюдения CSS 1102 проводились на 60-сантиметровом телескопе RC600 КГО ГАИШ в три даты: 1 сентября, 27 октября 2020 г. и 10 июля 2021 г. Измерения выполнялись в B , V , Rc , Ic . Кроме того, в полосе B было проведено два мониторинга: первый длительностью 75 минут (1 сентября 2020 г.) и второй — 125 минут (27 июля 2021 г.).

Результаты многоцветной фотометрии CSS 1102 приведены в таблице 27. Ошибки фотометрии составляют 0.01 — 0.03 mag, что объясняется небольшой высотой объекта в КГО даже в верхней кульминации (склонение CSS 1102 составляет -21°). В течение примерно двух месяцев яркость CSS 1102 изменилась в фильтрах B , V , Rc примерно на 0.2^m , тогда как в фильтре Ic — лишь на 0.08^m .

Периодограмма Ломба-Скаргла и вейвлет-анализ кривой блеска CSS 1102 показали, что 1 сентября 2020 г. и 10 июля 2021 г. у нее наблюдался фликкер-эффект. Кривые блеска приведены на рис. 4.1. Амплитуда быстрой переменности в обе даты составляла ≈ 0.1 mag в полосе B , при точности фотометрии 0.01 mag. Заметим, что 10 июля 2021 г. наблюдалось как характерное время изменения блеска порядка 50 минут (как и 1 сентября 2020 г.), так и более короткопериодические изменения с характерным временем порядка 10 минут.

Таблица 27 — Блеск CSS 1102 в фильтрах B , V , Rc , Ic .

Полоса	01.09.2020	27.10.2020
B	14.45 ± 0.01	14.22 ± 0.01
V	12.87 ± 0.01	12.65 ± 0.01
Rc	12.03 ± 0.02	11.85 ± 0.01
Ic	10.89 ± 0.03	10.81 ± 0.03

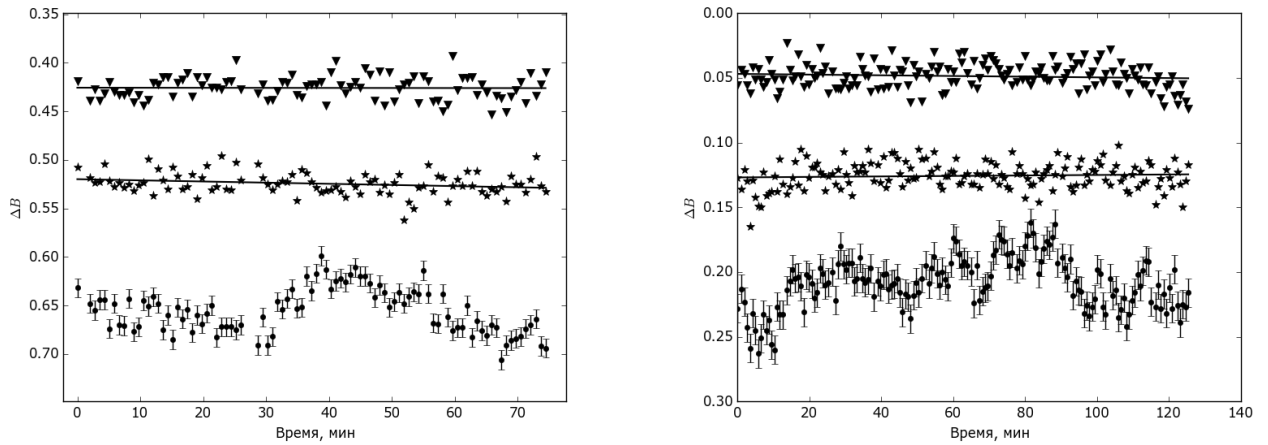


Рисунок 4.1 — Кривая блеска CSS 1102 в фильтре B (точки) по данным, полученным во время мониторинга 1 сентября 2020 (слева) и 10 июля 2021 (справа). Звездочками и треугольниками обозначены измерения блеска для звезд сравнения.

Спектры CSS 1102 были получены 31 августа и 28 октября 2020 г. на 2.5-м. телескопе КГО ГАИШ с помощью спектрографа ТДС (щель 1"). Для моделирования распределения энергии в спектре красного гиганта использовалась S-звезда HD64332, для которой были получены спектры с 1" и 10" щелью.

Все полученные спектры были исправлены за межзвездное покраснение. Величины избытка цвета E_{B-V} для CSS 1102 составил 0.16, для HD64332 — 0.06 [162].

Присутствие в спектральном распределении энергии CSS 1102 как молекулярных полос, характерных для спектров красных гигантов, так и эмиссионных линий и избытка излучения в коротковолновой области (рис. 4.2) дает основания рассматривать данную систему как кандидата в симбиотические звезды.

Сравнение спектров CSS 1102 и S-звезды HD64332 показывает их хорошее согласие на длинах волн, превышающих 4500 Å. Это позволяет утверждать, что

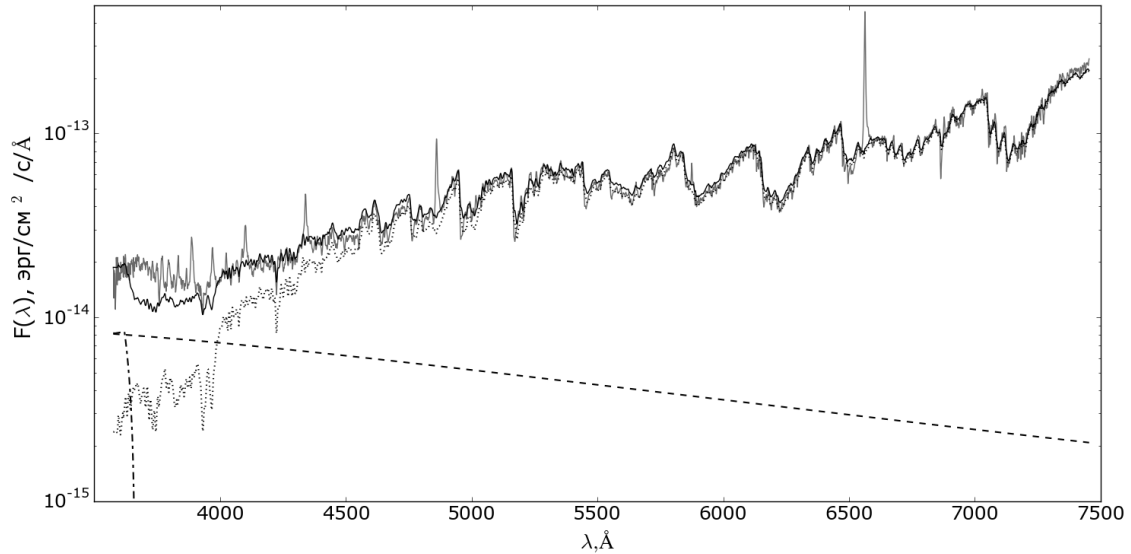


Рисунок 4.2 — Исправленный за межзвездное покраснение наблюдаемый (серая линия) и смоделированный (черная линия) спектры CSS 1102 и модельные спектры отдельных компонентов системы: пунктирная линия — красный гигант, штриховая линия — диск, штрих-пунктирная линия — туманность

холодный компонент CSS 1102 принадлежит к подклассу циркониевых звезд с типом S4.5/2 и эффективной температурой порядка 3400 К. Кроме того, известное точное расстояние до HD64332 (612 пк согласно [163]) дает возможность оценить расстояние до CSS 1102, которое составляет 5 кпк.

В спектре поглощения CSS 1102, помимо молекулярных полос ZrO ($\lambda 6345$, $\lambda 6473$), регистрируются глубокие полосы TiO ($\lambda 5847$, $\lambda 7054$ и др.). Наличие последних в ранних подклассах S-звезд служит одним из температурных критериев. Также хорошо выражена полоса YO вблизи 6132 \AA . Подобный спектр указывает на то, что атмосфера красного гиганта активно обогащается элементами s-процесса. Это обогащение приводит к изменению спектрального класса звезды от исходного M через промежуточный MS к S-классу (и в будущем — к углеродной звезде класса C).

Сопоставление спектрального распределения энергии в спектре CSS 1102 со спектром абсолютно черного тела с эффективной температурой $T_{eff} = 3400 \text{ K}$ в инфракрасной области (рис. 4.3) не показывает избытка ИК-излучения. Это свидетельствует об отсутствии околозвездной пылевой оболочки. Следовательно, CSS 1102 относится к S-типу симбиотических звезд.

Эмиссионный спектр CSS 1102 сравнительно бедный. Основной вклад в него вносят линии бальмеровской серии водорода. Измеренные потоки в этих ли-

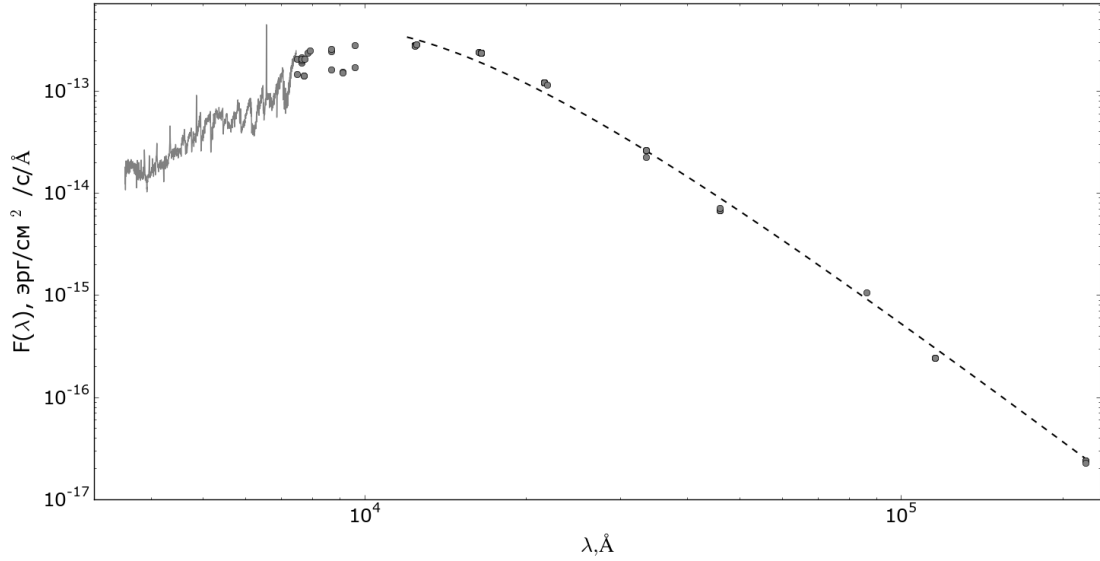


Рисунок 4.3 — Спектр абсолютно черного тела (штриховая линия) с $T_{eff} = 3400 K$, исправленный за межзвездное покраснение наблюдаемый спектр CSS 1102 (сплошная линия), поток в ближнем и среднем ИК диапазоне (точки) по данным из VizieR ([164]).

ниях приведены в таблице 28. При измерениях уровень континуума определялся по спектру звезды HD64332, полученному с щелью $10''$. Основным источником ошибок при измерении потоков – неопределенность положения континуума; для слабых линий ошибки становятся особенно значительными.

Эмиссионные линии водорода наблюдаются у многих одиночных S-звезд (особенно у тех, которые относятся к миридам). Однако вычисленный для CSS 1102 бальмеровский декремент ($\frac{H\gamma}{H\beta} = 0.42 \pm 0.08$, $\frac{H\delta}{H\beta} = 0.29 \pm 0.09$) указывает на то, что образование линий водорода происходит именно в туманности, а не в атмосфере холодной звезды. Дополнительным аргументом в пользу симбиотической природы CSS 1102 служат присутствующие в спектре линии нейтрального гелия He I, а также слабые запрещенные линии [Ne III].

К сожалению, в спектре не удалось зарегистрировать линии ионов с высокими потенциалами ионизации (например, He II $\lambda 4686$). Это обстоятельство не позволяет надежно оценить температуру горячего компонента системы. Используя температурные критерии для горячих компонентов симбиотических звезд, можно дать лишь приближенную оценку $40000 < T_{hot} < 55000K$ [165]. Излучение источника с такой высокой температурой в оптическом диапазоне не проявляется и может быть обнаружено только в дальнем ультрафиолете, что типично для симбиотических звезд в спокойном состоянии.

Таблица 28 — Потoki в эмиссионных линиях в спектре CSS 1102, полученном 31.08.2020.

Линия	Поток, 10^{-14} эрг/($\text{cm}^2 \text{c}$)
H α	181 ± 9
He I $\lambda 5876$	5.1 ± 1.8
H β	31.5 ± 1.0
H γ	14.4 ± 2.2
H δ	8.6 ± 1.9
He I $\lambda 4026$	2.0 ± 1.5
H ζ	5.3 ± 2.0
[Ne III] $\lambda 3869$	1.1 ± 0.8

Сравнение спектров, полученных 31 августа и 28 октября 2020 года, выявило изменения в профиле линии H α в красном крыле (рис. 4.4). Аппроксимация профиля суммой трех функций Фойгта показала, что интенсивность компонента, соответствующего области, движущейся с характерной скоростью около 500 км/с, заметно уменьшилась к октябрю по сравнению с августом.

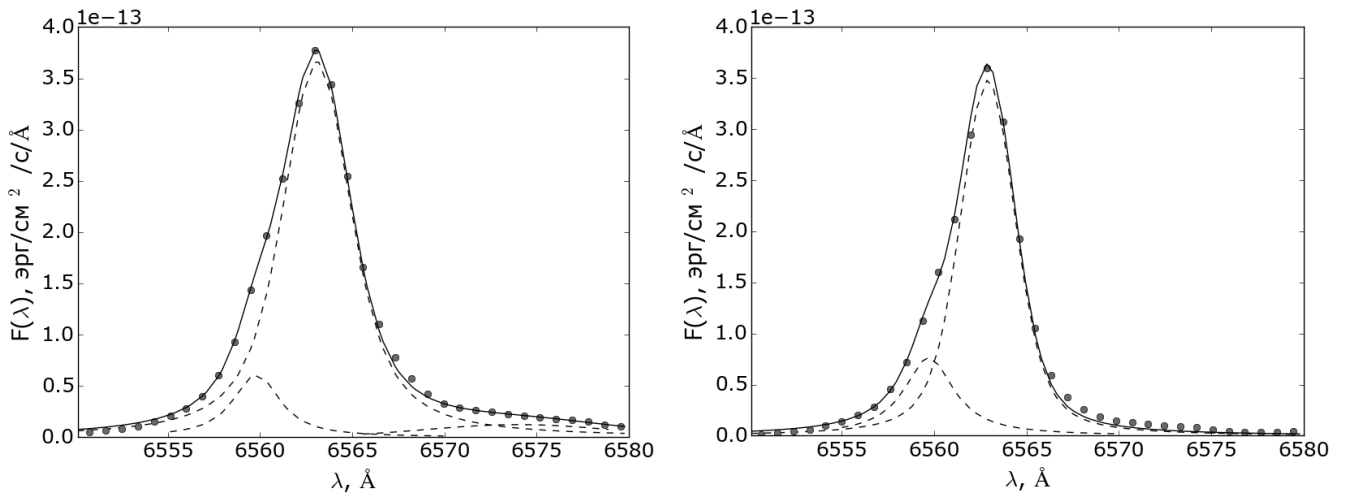


Рисунок 4.4 — Профили линии H α , полученные 31.08.2020 (слева) и 28.10.2020 (справа). Уровень непрерывного спектра соответствует нулевому значению потока

На рисунке 4.2 представлены спектры CSS 1102 и S-звезды HD64332. Видно, что, несмотря на хорошее совпадение в красной области, в синей и ультрафиолетовой частях спектра наблюдаются значительные расхождения. Это

различие не может быть полностью объяснено вкладом излучения туманности в непрерывный спектр системы.

По аналогии с другими симбиотическими звездами, демонстрирующими подобный избыток в голубой области спектра, можно предположить наличие вокруг горячего компонента CSS 1102 аккреционного диска — так называемого теплого компонента. На рисунке 4.2 показано распределение энергии в спектрах отдельных компонентов системы: холодного компонента — звезды спектрально-го класса S4.5/2; туманности с электронной температурой $T_e = 10000 K$ и мерой эмиссии $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-5}$ и аккреционного диска;

Модельное распределение энергии в спектре аккреционного диска рассчитывалось по формулам, представленным в работе [166]:

$$F_{disk}(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 d^2} \sin i \int_{R_1}^{R_{out}} \frac{2\pi R}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT(R)}\right) - 1} dR,$$

$$T(R) = \left[\frac{3GM_1 \dot{M}}{8\pi\sigma R^3} (1 - (R_1/R)^{0.5}) \right]^{0.25},$$

где R_1 — радиус горячего компонента, R_{disk} — внешний радиус диска, d — расстояние до системы, i — угол наклона к лучу зрения, M_1 — масса горячего компонента, \dot{M} — темп аккреции на горячий компонент. Расстояние до системы принималось равным 5 кпк. Предполагалось, что внутренний радиус аккреционного диска равен радиусу горячего компонента, а внешний радиус много больше радиуса горячего компонента, поэтому верхний предел интегрирования принимался равным $1 R_\odot$. Отметим, что модельное распределение энергии в спектре аккреционного диска не противоречит наблюдениям при значениях параметров из достаточно широких интервалов: $R_1 = 0.008 - 0.02 R_\odot$, темп аккреции на горячий компонент $< 10^{-7} M_\odot/\text{год}$, $i > 15^\circ$ (величина угла i ограничена снизу тем фактом, что у системы наблюдается фликкер-эффект, а значит видна внутренняя часть диска). Это связано с тем, что излучение аккреционного диска у CSS 1102 заметно лишь в малом интервале длин волн полученных спектров.

При расчете светимости диска считалось, что аккреционный диск геометрически тонкий. Тогда по формуле

$$L = 2 \int_{R_1}^{R_{disk}} \sigma T(R)^4 2\pi R dR$$

находим светимость диска $L < 450 L_{\odot}$ (для приведенного выше диапазона параметров).

Из аппроксимации спектра, приведенного на рис. 4.2, моделью был оценен вклад каждого из компонентов системы в суммарное излучение в диапазоне, соответствующем фотометрической полосе B . Поток от аккреционного диска составляет $5.0 \cdot 10^{-13}$ эрг/(см² с), от туманности — 3.1×10^{-14} эрг/(см² с), от холодного компонента — 1.4×10^{-12} эрг/(см² с). По данным фотометрических измерений, амплитуда фликкер-эффекта 1 сентября 2020 г. и 10 июля 2021 г. равнялась примерно 0.1 mag. Следовательно, относительные изменения потока от аккреционного диска, составляли около 30 %.

Таким образом, анализ спектральных наблюдений, полученных 31 августа и 28 октября 2020 г. на 2.5-м. телескопе КГО с помощью спектрографа ТДС, позволяет классифицировать CSS 1102 как симбиотическую звезду. Данные инфракрасных наблюдений, полученные из базы VizieR [164], демонстрируют отсутствие избытка ИК-излучения в распределении энергии, поэтому CSS 1102 относится к подклассу симбиотических звезд S-типа.

Моделирование распределения энергии позволило получить оценку расстояния до системы ≈ 5 кпк и определить физические параметры ее компонентов: холодный компонент — звезда спектрального класса S4.5/2, туманность с электронной температурой $T_e = 10000$ К, аккреционный диск с внутреннем радиусом $R_1 = 0.01\text{--}0.14 R_{\odot}$, наклонением $i > 15^{\circ}$ и светимостью $L < 450L_{\odot}$.

Кроме того, по результатам мониторинга в полосе B , проведенного 1 сентября 2020 г. и 10 июля 2021 г., у CSS 1102 впервые был зарегистрирован фликкер-эффект — явление, редко наблюдаемое у симбиотических звезд. Амплитуда быстрой переменности составила 0.1 mag.

4.2 V520 And

В работе [2] было отобрано 35 кандидатов в симбиотические звезды на основе данных нескольких каталогов. Для этого на базе III Каталога переменных звезд, открытых либо подтвержденных в ходе обзора ASAS-SN [167; 168], были выбраны объекты, демонстрирующие полуправильную или неправильную переменность с характерными временами переменности превышающими

Таблица 29 — Журнал спектральных наблюдений V520 And.

Объект	Дата	Экспозиция в <i>B</i> -канале	Экспозиция в <i>R</i> -канале
V520 And	2023/01/25	1 × 300 с	1 × 300 с
V520 And	2023/09/15	2 × 300 с	2 × 300 с
V520 And	2023/10/13	2 × 300 с	2 × 300 с
V520 And	2023/12/04	24 × 300 с	20 × 300 с
V520 And	2023/12/15	3 × 300 с	3 × 300 с
V520 And	2024/06/12	2 × 300 с	2 × 300 с

50 суток. Для отобранных объектов были посчитаны показатели цвета, из них выбирались красные гиганты по критериям, предложенным в работе [117]. На следующем этапе, используя данные спутника GALEX, из полученного списка выделили объекты с величиной $FUV - NUV < 1$, которая указывает, что в системе, по всей видимости, присутствует белый карлик.

Пять объектов из этого списка уже были известны ранее как симбиотические системы. В число отобранных кандидатов вошла, в частности, звезда V520 And.

Для подтверждения симбиотической природы V520 And были проведены спектральные наблюдения на ТДС на 2.5-м. телескопе КГО (журнал наблюдений приведен в табл. 29). Также для поиска и исследования фликкер-эффекта 4 декабря 2023 г. был проведен спектральный мониторинг на спектрографе ТДС в течение 2 часов и 14 октября 2023 г. был проведен фотометрический мониторинг длительностью 2.5 часа в полосе *B* на RC600 КГО.

Также 16 декабря 2023 г. и 6 января 2024 г. были выполнены наблюдения V520 And со спектрографом высокого разрешения SHEF на 2.5-м. телескопе КГО.

Конструкция SHEF включает две основные части: приемный узел, размещенный в фокусе Кассегрена, и эшелле-спектрограф, установленный на термостатированном оптическом столе в подвальном помещении башни. Приемный узел обеспечивает переброс изображения звезды на входной торец 25-метрового кварцевого оптоволокна, формируя апертуру диаметром 2.5" в проекции на небо. Эшелле-спектрограф выполнен по классической оптической

схеме и содержит два линзовых дублета для согласования светосилы волокна ($F/3.3$) и спектрографа ($F/13.3$), внеосевой параболический коллиматор с диаметром пучка 45 мм, эшелле-решетку R2 75 штр./мм, стеклянную призму кросс-дисперсии двойного прохождения, объектив Nikon 200 f/2 и КМОП-детектор ASI 6200 MM Pro. Рабочий диапазон спектрографа составляет от 4200 до 7500 Å. Разрешающая сила вблизи линии $H\alpha$ $R \sim 25000$, она определялась в ходе наблюдений с использованием промежуточной щели. Калибровка длин волн осуществляется с помощью лампы с полым катодом (линии железа, аргона и примесей). Обработка полученных данных выполняется программой, написанной на языке Python Додиным А. В.

Совокупность эмиссионных особенностей, зарегистрированных в спектре V520 And, вместе с критериями, предложенными в работе [117], позволяет уверенно подтвердить симбиотическую природу этого объекта. Для исследования изменчивости спектральных характеристик V520 And был выполнен ряд наблюдений с использованием спектрографа ТДС. Все полученные спектры представлены на рис. 4.5. Видно, что, хотя форма непрерывного спектра во всем рабочем диапазоне спектрографа сохраняется в течение всего времени наблюдений (за исключением коротковолновой области 12 июня 2024 г.), имеет место выраженная переменность как эмиссионных линий, так и линий поглощения. В последнем из полученных спектров наблюдается значительное падение интенсивности в коротковолновой части и практически полное исчезновение эмиссионных линий — сохраняется лишь слабая линия $H\alpha$.

Наиболее развитый эмиссионный спектр V520 And зафиксирован в сентябре 2023 г. В нем уверенно определяются линии водорода, He I и Fe II. Также регистрируется избыток излучения около бальмеровского скачка. В синей области спектра присутствует слабая линия [Ne III], сливающаяся с линией гелия.

На рис. 4.6 приведены фрагменты спектров V520 And в окрестности 5000 Å. На всем протяжении полосы TiO $\lambda 4950$ видны детали, обусловленные молекулярными полосами и линиями холодного компонента. Эти особенности остаются стабильными от одной эпохи наблюдений к другой (см., например, линии в интервале 5043–5050 Å). Исключение составляют совпадающие по положению с линией [O III] $\lambda 5007$ и линией He I $\lambda 5015$. Эти линии были слабыми 25 января 2023 г., но заметно усилились к 15 сентября 2023 г., одновременно с общим возрастанием эмиссионного спектра звезды. Данный факт позволяет предположить наличие в спектре слабой эмиссионной линии [O III] $\lambda 5007$.

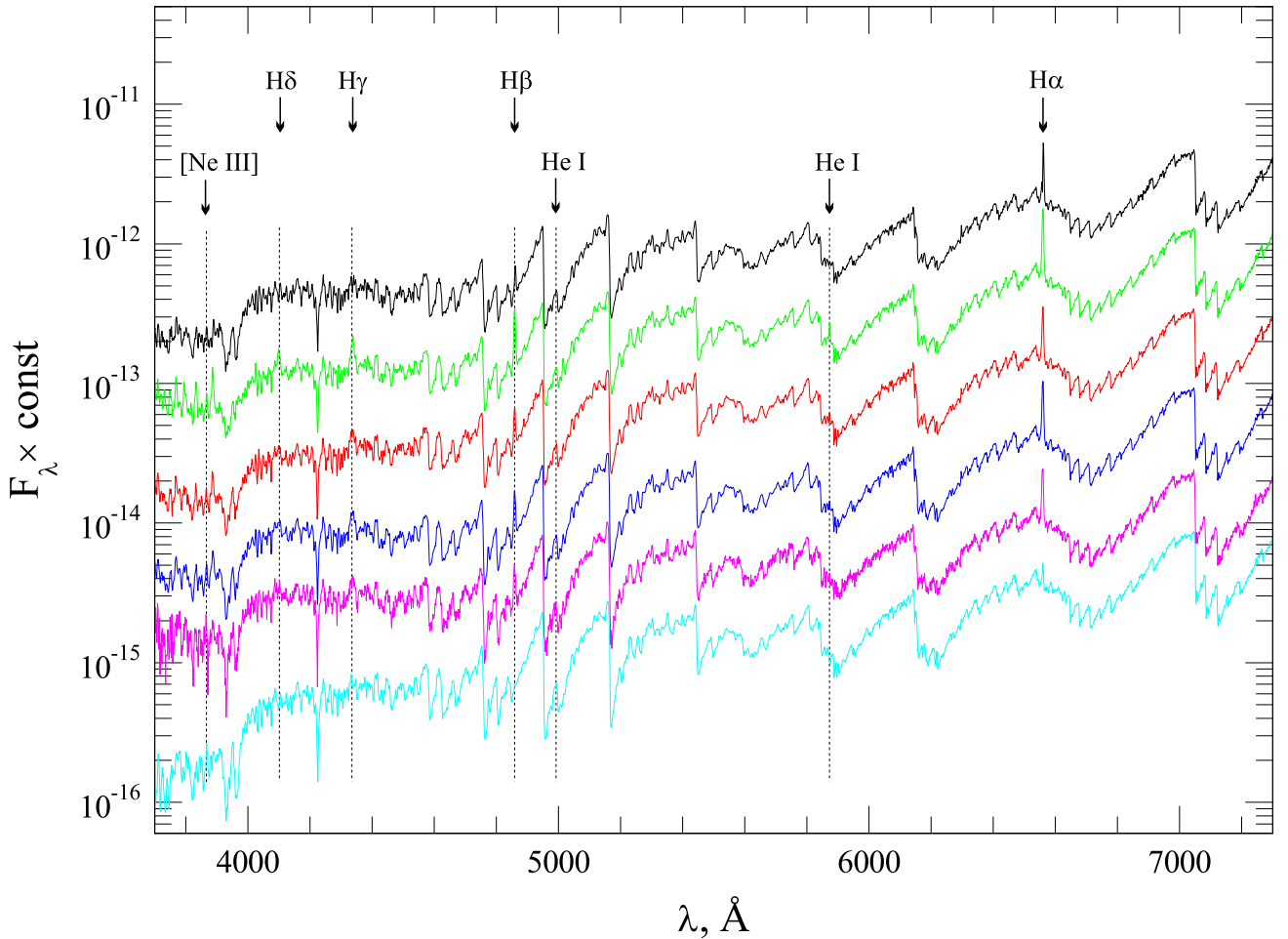


Рисунок 4.5 — Исправленные за межзвездное покраснение спектры V520 And, полученные (сверху вниз в хронологическом порядке) 25.01.2023, 15.09.2023, 13.10.2023, 04.12.2023, 15.12.2023 и 12.06.2024.

На нижней панели рис. 4.7 показаны изменения интенсивности и профиля линии $H\alpha$ в период наших наблюдений. Видно, что профиль имеет сложную форму, представленную, по-видимому, двумя основными компонентами. Соотношение компонентов меняется, однако, низкое спектральное разрешение не позволяет проследить это надежно.

На спектрах высокого разрешения, зарегистрированных 16 декабря 2023 г. и 6 января 2024 г., отчетливо видна двугорбая структура профиля линии $H\alpha$. Верхняя панель рис. 4.7 демонстрирует фрагменты этих спектров после сглаживания сверткой с функцией Гаусса с $\sigma = 3$ пикселя. Расстояние между двумя основными эмиссионными пиками соответствует лучевой скорости около 100 км/с. Поток между ними снижается до уровня континуума, что при такой ширине профиля может указывать на абсорбционную природу этого провала. Профиль линии можно аппроксимировать суммой профилей Фойгта для эмиссионной составляющей и профиля Гаусса — для абсорбционной

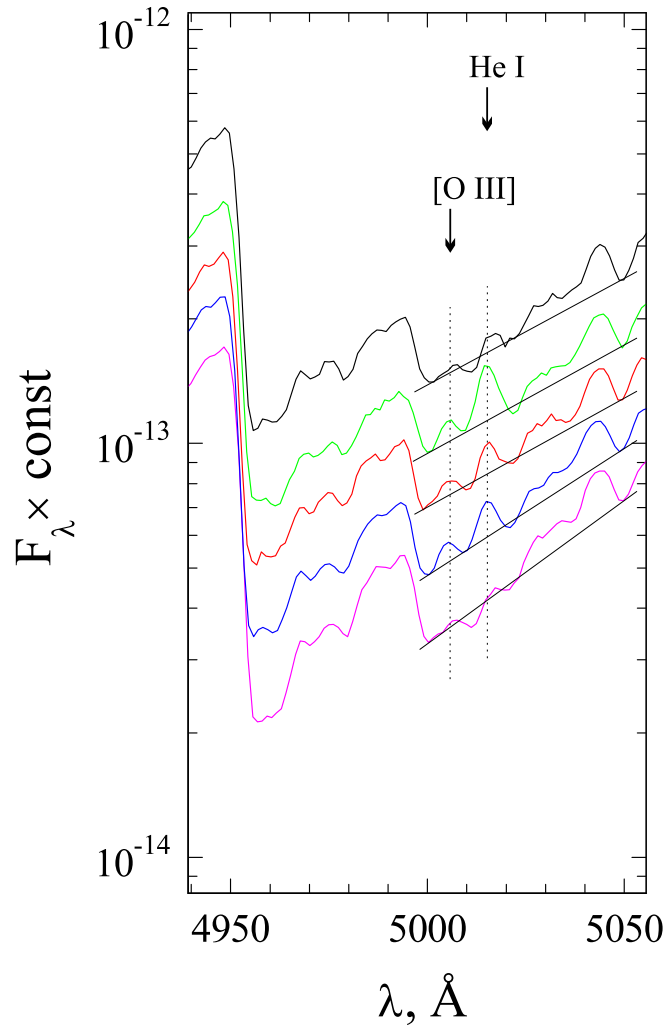


Рисунок 4.6 — Фрагменты спектров V520 And, полученные (сверху вниз) 25.01.2023, 15.09.2023, 13.10.2023, 04.12.2023 и 12.06.2024. Отрезками для наглядности соединены абсорбционные особенности в спектре холодного компонента на 5000\AA и 5050\AA

(см. верхнюю панель на рис. 4.7). Значительная ширина и глубина абсорбционного компонента указывает, что это не может быть линия поглощения, образованная в атмосфере красного гиганта спектрального класса M6III. Более вероятным представляется поглощение излучения в веществе ветра холодного компонента либо в газовых потоках во внешних частях системы. В пользу такого предположения говорят и результаты работы [126], в которой анализировались профили $H\alpha$ у большого числа симбиотических звезд. Было показано, что в случае двугорбого профиля провал смещен в коротковолновую сторону относительно средней скорости, а относительная скорость абсорбционного компонента ~ 30 км/с — величина, близкая к характерным скоростям газовых потоков в таких системах. Аналогичный двугорбый профиль $H\alpha$ наблюдался у повторной симбиотической новой T CrV в спокойном состоянии [169], а также

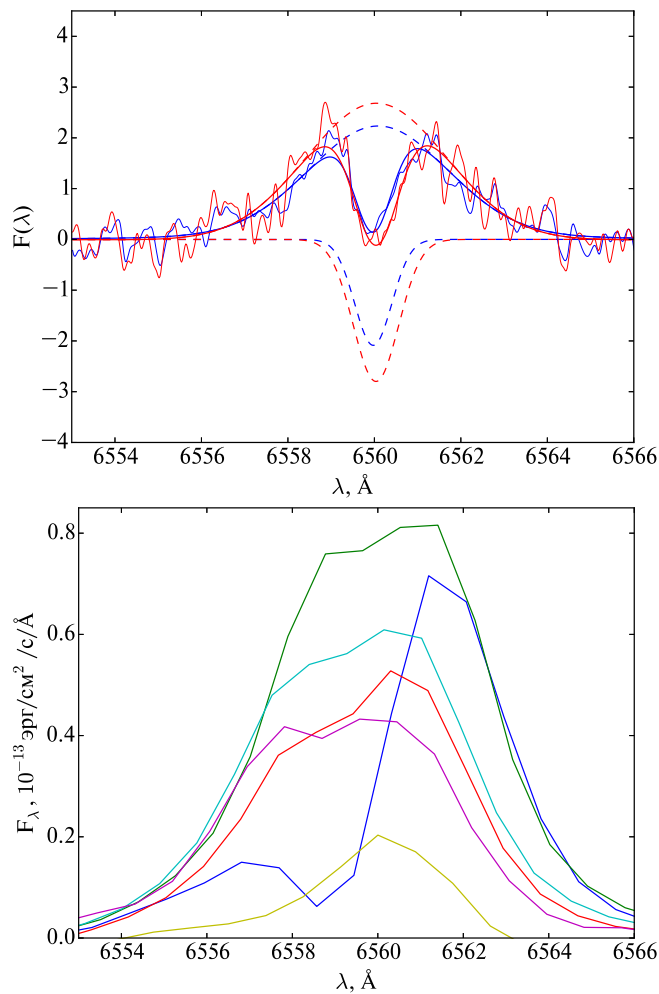


Рисунок 4.7 — Линия $\text{H}\alpha$ на спектрах высокого (верхний рисунок) и низкого (нижний рисунок) разрешения. Уровень непрерывного спектра соответствует нулевому значению потока. На спектрах высокого разрешения тонкие линии — наблюдаемые данные, толстые линии — аппроксимация компонентами, нарисованными штриховыми линиями, синие линии — спектр, полученный 16.12.2023, красные линии — спектр, полученный 06.01.2024. На нижнем рисунке линия $\text{H}\alpha$ на спектрах, полученных 25.01.2023 (синий), 15.09.2023 (зеленый), 13.10.2023 (красный), 04.12.2023 (голубой), 15.12.2023 (фиолетовый), 12.06.2024 (желтый).

в минимуме блеска 2023 г. [170]. В работе [169] профиль $\text{H}\alpha$ также описывался суммой эмиссионной и абсорбционной компонент.

Вместе с тем, двугорбая структура профиля $\text{H}\alpha$ может быть обусловлена присутствием в системе аккреционного диска. В этом случае скорость на его внешней границе составляет приблизительно 50–60 км/с, что согласуется с оценкой, полученной [171] по двугорбому профилю $\text{H}\alpha$ у повторной симбиотической новой Т СгВ в спокойном состоянии. Важно отметить, что у Т СгВ двугорбый профиль регистрировался во время минимума перед возможной сле-

дующей вспышкой, когда потоки в эмиссионных линиях существенно ослабли [170]. Для V520 And оба спектра высокого разрешения были получены в эпоху, близкую к максимуму эмиссионного спектра.

Дополнительным аргументом в пользу симбиотической природы V520 And служит обнаруженная в ходе фотометрического мониторинга 14 октября 2023 г. быстрая переменность блеска в полосе B . Полученная кривая блеска представлена на рис. 4.8. Амплитуда фликкер-эффекта составила 0.08 mag при точности 0.009 mag.

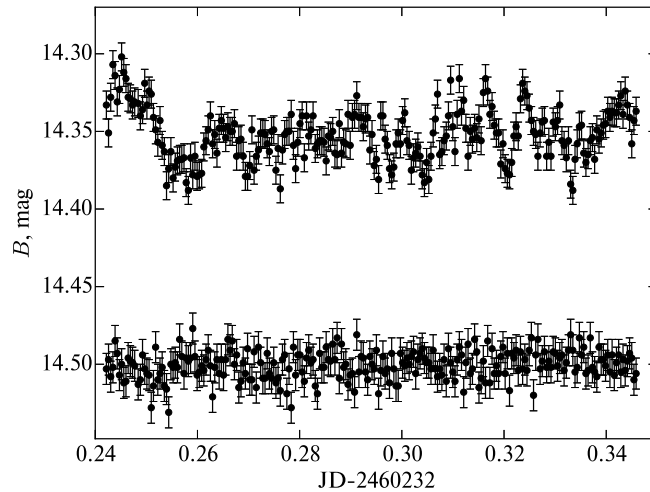


Рисунок 4.8 — Кривые блеска V520 And (сверху) и звезды сравнения (снизу) в полосе B , полученные 14 октября 2023 г. во время фотометрического мониторинга.

Спектральный мониторинг V520 And был проведен 4 декабря 2023 г. Обработка данных спектрального мониторинга проводилась как описано в главе 3.

Быструю переменность эквивалентной ширины мы искали у наиболее ярких линий в спектре. Она была зарегистрирована в линиях $H\alpha$, $H\beta$ и $He\ I\ \lambda 5876$ (рис. 4.9). Так, у линий $H\alpha$ и $H\beta$ эквивалентная ширина меняется примерно на 8 – 10%. Если профиль линии $H\alpha$ разложить на компоненты, как было описано выше, то оказывается, что фликкер-эффект регистрируется только у основного (эмиссионного) компонента, абсорбционный компонент в течение мониторинга остается постоянным. Амплитуда переменности $He\ I$ намного выше, чем у линий бальмеровской серии водорода, и составляет $\sim 30\%$ относительно медианного значения.

В запрещенной линии $[Ne\ III]\ \lambda 3869$ фликкер-эффект не регистрируется: разброс точек не превышает $1-2\sigma$ (рис. 4.9). Поскольку в симбиотических звездах эта линия формируется в протяженной разреженной области туманности,

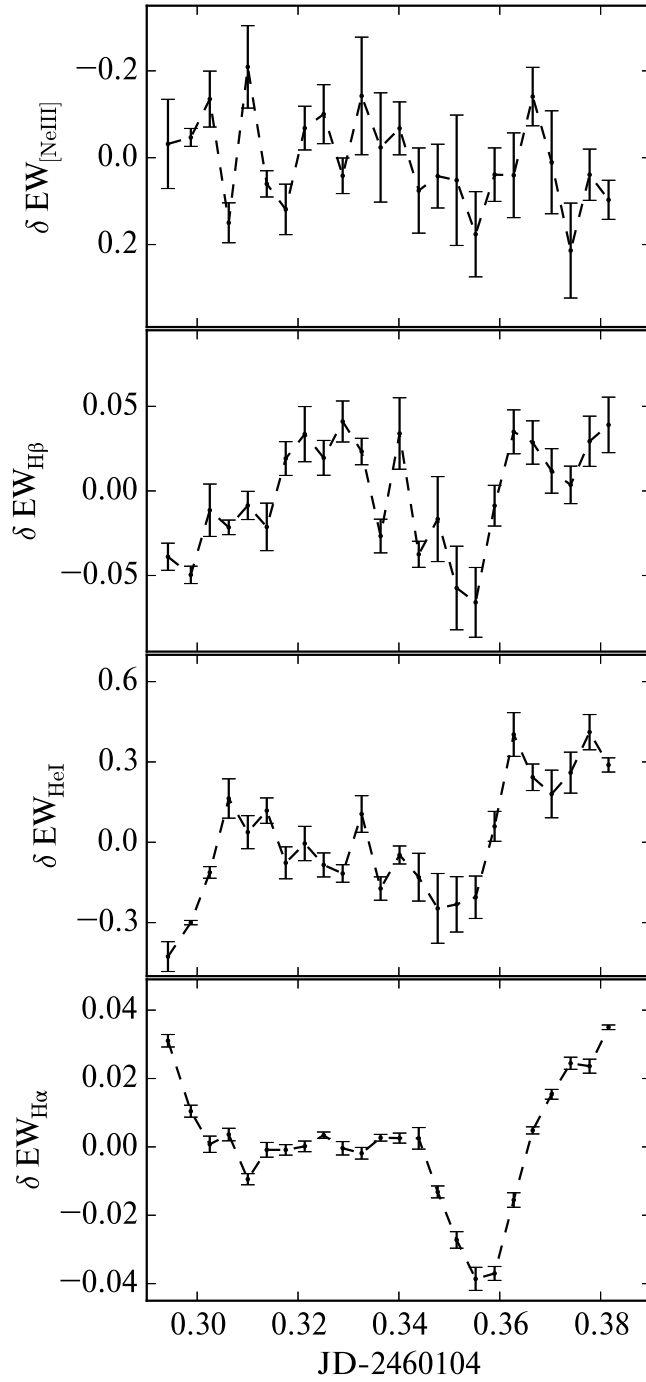


Рисунок 4.9 — Кривые изменения эквивалентных ширин линий $H\alpha$, $H\beta$, $He\ I\ \lambda 5875$, $[Ne\ III]\ \lambda 3869$, полученные во время мониторинга V520 And 04.12.2023 г.

окружающей систему, быстрой переменности в ней не ожидается. Ее отсутствие служит важным подтверждением того, что обнаруженная переменность в других линиях не связана с ошибками обработки или наблюдений.

Постоянство формы континуума V520 And практически во всем рабочем диапазоне спектрографа во все даты наблюдений, а также исчезновение эмиссионных линий и ультрафиолетового избытка в спектре от

12 июня 2024 г. позволяют выделить вклад переменного компонента. На верхней панели рис. 4.10 сопоставлены спектр, полученный 15 сентября 2023 г., и спектр от 12 июня 2024 г., нормированный так, чтобы континуумы совпали в области $\lambda > 6000 \text{ \AA}$. В красной области наблюдается практически полное совпадение, что указывает на неизменность спектрального класса красного гиганта в обе эпохи (немного более ранний, чем M6III). Разность этих двух спектров приведена на нижней панели того же рисунка. В ней отчетливо видны многочисленные линии H I, He I и Fe II, а также заметный бальмеровский скачок. Кроме того, имеются указания на присутствие линий [O III] $\lambda 5007$, [Ne III] $\lambda 3869$ и He II $\lambda 4686$. Таким образом, выполняется основной наблюдательный критерий отнесения V520 And к классу симбиотических звезд — наличие в спектре красного гиганта эмиссионных линий, характерных для планетарных туманностей.

Сильная изменчивость эмиссионного спектра на подобных временных интервалах иногда наблюдается у известных симбиотических систем. Так, в активной фазе у T CrV регистрировался богатый эмиссионный спектр. С марта 2023 г. у звезды начал наблюдаться минимум блеска перед следующей возможной вспышкой, и потоки в эмиссионных линиях водорода и гелия стали снижаться. К июню 2023 г. поток в H α упал более чем в четыре раза по сравнению с мартом, линии He I и He II исчезли, тогда как поток в [Ne III] остался неизменным. Иными словами, менее чем за полгода яркий эмиссионный спектр практически полностью пропал [170].

Наблюдаемую небольшую величину бальмеровского скачка можно было бы объяснить, например, излучением туманности с высокой электронной температурой $T_e > 20000 \text{ K}$. Однако слабость линии He II $\lambda 4686$ указывает на относительно холодный горячий компонент с $T_h \sim 50000 \text{ K}$ ([172], [165]), при которой электронная температура туманности не может достигать столь высоких значений. Если же зафиксировать температуру туманности на типичном для симбиотических звезд уровне $T_e = 10000 \text{ K}$, то расчетный бальмеровский скачок оказывается большим. Однако он может замываться излучением горячего компонента и дополнительным вкладом аккреционного диска (со светимостью меньше $2L_\odot$), что позволяет хорошо воспроизвести наблюдения (см. рис. 4.10). При увеличении T_h до 60000 K без привлечения аккреционного диска согласовать расчетную величину бальмеровского скачка с наблюдениями не удастся. Светимость диска в этом случае не превышает $10L_\odot$. Дополнительным аргументом в пользу присутствия аккреционного диска в системе служит

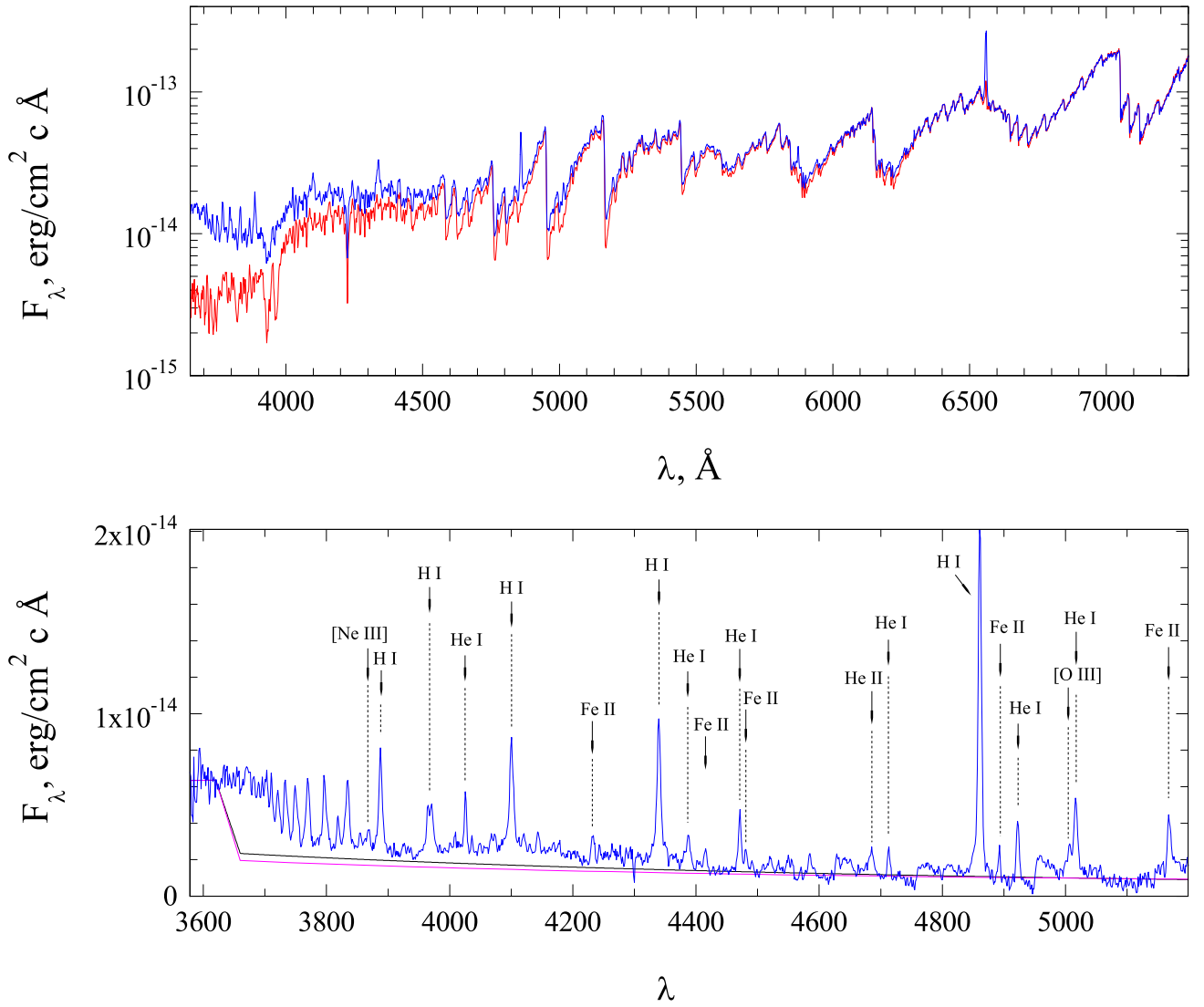


Рисунок 4.10 — Верхняя панель: спектры V520 And от 15.09.2023 (синяя линия) и 12.06.2024 (красная линия), совмещенные в диапазоне $\lambda > 6000 \text{ \AA}$; нижняя панель: разность этих спектров (синяя линия) и спектры суммы излучения в континууме туманности с $T_e = 10000\text{K}$ и горячего компонента с $T_{eff} = 50000\text{K}$ без аккреционного диска (розовая линия) и с диском со светимостью $2L_\odot$ (черная линия).

зарегистрированный примерно в тот же период фликкер-эффект, о котором говорилось выше.

Таким образом, V520 And представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из красного гиганта, белого карлика с температурой $T_h \sim 50000 \text{ K}$ и аккреционного диска, светимость которого не превышает несколько светимостей Солнца. Вся система погружена в туманность сложной структуры, сформированной ветром холодного компонента. Основными источниками возбуждающего излучения являются переходный слой и внутренние области ак-

крейционного диска и поверхность белого карлика. Линии H I и He I возникают преимущественно в сравнительно плотной области в непосредственной близости от белого карлика и диска, тогда как формирование запрещенных линий происходит во внешних, разреженных частях туманности.

Двойственная природа звезды может проявляться в фотометрических данных. Эффективным инструментом для анализа изменчивости относительно ярких объектов служит обзор ASAS-SN [167; 168]. V520 And принадлежит к переменным типа SRA, то есть демонстрирует тип переменности, характерный для гигантов поздних спектральных классов.

Дополнительным параметром, чувствительным к наличию горячего компонента в двойной системе, служит показатель цвета $NUV - J$. Согласно синтетической фотометрии, полученной по спектрам красных гигантов классов M2–M10 [28], величина показателя $NUV - J$ для одиночных звезд этих типов превышает 11.6. У V520 And данное значение заметно ниже и составляет 10.3.

Таким образом, в пользу симбиотической природы V520 And свидетельствуют несколько признаков: присутствие в спектре эмиссионных линий и бальмеровского скачка, регистрация фотометрического и спектрального фликкер-эффекта, избыток ультрафиолетового излучения (показатели цвета $FUV - NUV$ и $NUV - J$). Следовательно, V520 And представляет собой двойную систему.

На рис. 4.11 приведена кривая блеска, построенная на основе данных обзора ASAS-SN и свернутая с найденным нами периодом $P = 73.69$ суток. Такое значение периода типично для переменных типа SRA, к которым может принадлежать холодный компонент V520 And. Период колебаний блеска остается достаточно стабильным (изменяется в основном амплитуда), что допускает альтернативную интерпретацию: наблюдаемая переменность может быть обусловлена орбитальным движением. Поскольку блеск системы меняется и в красной области спектра, источник этой изменчивости связан с холодным компонентом — вклад других составляющих в этом спектральном диапазоне пренебрежимо мал (см. рис. 4.10). У некоторых симбиотических звезд наблюдается эффект эллипсоидальности, возникающий при заполнении холодным компонентом своей полости Роша (см., например, [75], [173], [174]). Если это справедливо и для красного гиганта в системе V520 And, то орбитальный период двойной системы должен составлять $2P = 147.38$ суток. Следует отметить,

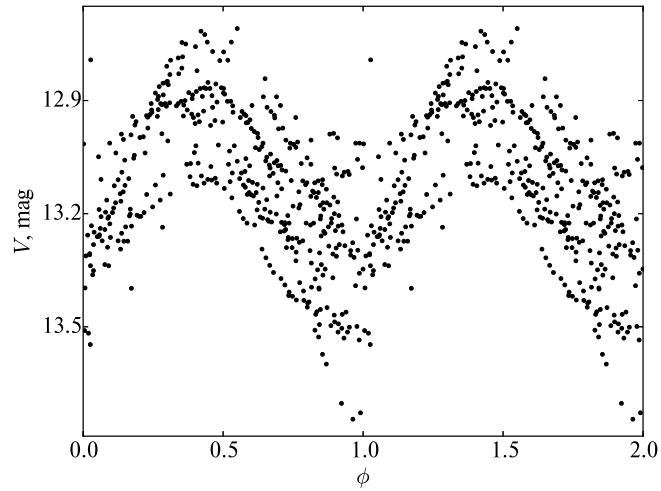


Рисунок 4.11 — Кривая блеска V520 And в полосе V , свернутая с периодом 73.69^d (по данным ASAS-SN)

что такое значение оказалось бы минимальным среди всех известных симбиотических звезд с определенными периодами.

Абсолютная болометрическая звёздная величина V520 And составляет -3.3 mag, что соответствует светимости красного гиганта $\approx 1700 L_{\odot}$. По данным каталогов VizieR нами построено распределение энергии в спектре V520 And (рис. 4.12), которое в инфракрасной области совпадает с излучением абсолютно черного тела с эффективной температурой 3200 К. Следовательно, V520 And относится к S-типу симбиотических звезд — системам, у которых отсутствует ИК-избыток. Близкая оценка температуры может быть получена и по спектральному классу: согласно [175], классам M5 III и M6 III соответствуют температуры 3355–3240 К. Интегрирование полученного распределения энергии с учетом неопределенности расстояния по данным Gaia дает диапазон светимости холодного компонента $1400 - 2200 L_{\odot}$, что согласуется с оценкой, полученной из наблюдаемого блеска в полосе K . Это позволяет определить размеры холодного компонента: $R_c = 120 - 155 R_{\odot}$.

Совместить в двойной системе красного гиганта таких размеров с полостью Роша при столь коротком орбитальном периоде возможно лишь при достаточно больших массах компонентов — суммарно несколько масс Солнца. Для оценки массы холодного компонента с помощью пакета MESA [176] были построены эволюционные треки звезд солнечной металличности с начальными массами от 1 до $4 M_{\odot}$ (рис. 4.13). Видно, что масса красного гиганта, удовлетворяющая полученным значениям светимости и температуры, лежит в интервале $0.6 - 1.3 M_{\odot}$ (при начальной массе звезды $< 2 M_{\odot}$). Такие небольшие массы

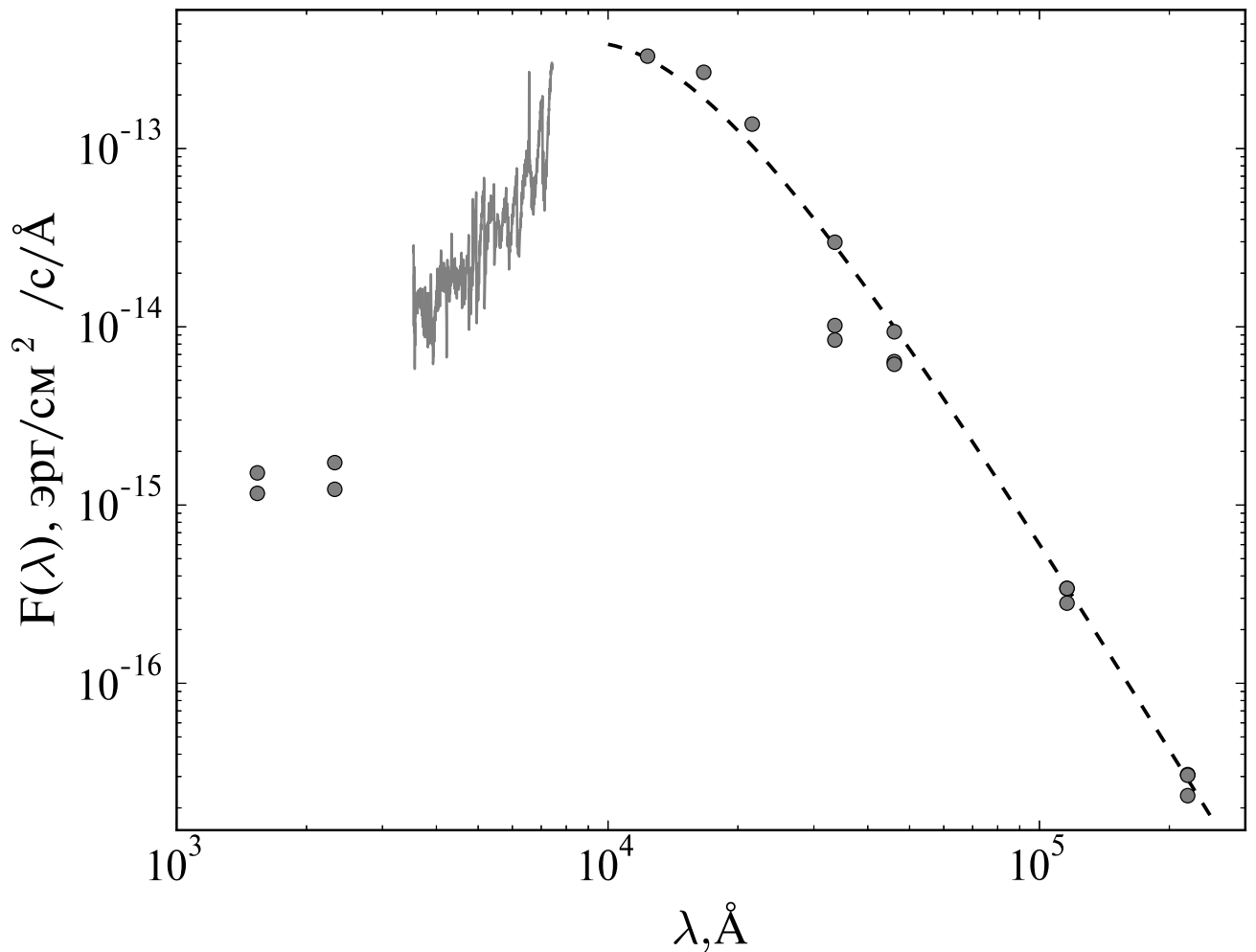


Рисунок 4.12 — Исправленный за межзвездное покраснение спектр (сплошная линия) и потоки в ближнем и среднем ИК - диапазонах для V520 And по данным из каталогов VizieR (точки). Штриховой линией показано распределение энергии в спектре абсолютно черного тела с $T_{eff} = 3200K$.

холодного компонента означают, что горячий компонент должен иметь массу в несколько масс Солнца, что противоречит его наблюдаемым проявлениям. Таким образом, период 147 суток не может являться орбитальным периодом системы.

Таким образом, сравнение спектров V520 And со спектром, полученным в момент исчезновения эмиссионной составляющей, позволило выделить большое число эмиссионных линий H I, He I, Fe II и бальмеровский скачок, а также, вероятно, слабые линии [O III] $\lambda 5007$, [Ne III] $\lambda 3869$ и He II $\lambda 4686$. Кроме этого, у этой звезды в ходе фотометрического мониторинга 14.10.2023 был обнаружен эффект быстрой переменности в полосе *B* с амплитудой 0.08^m , а в ходе спектрального мониторинга — быстрая переменность линий H I и He I. Эти признаки

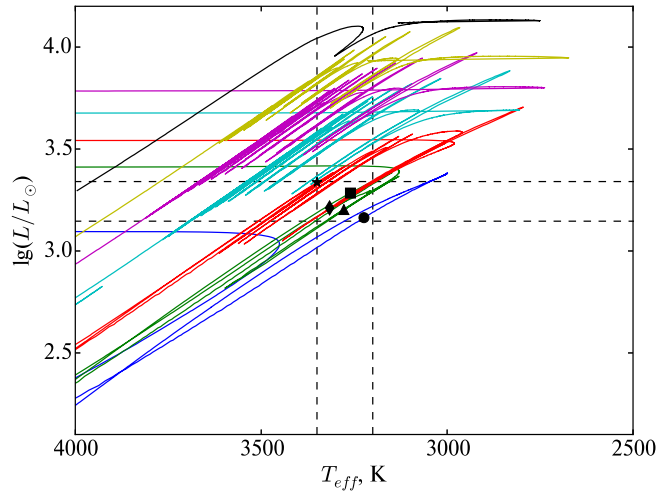


Рисунок 4.13 — Эволюционные треки звезд с солнечной металличностью и начальными массами (снизу-вверх) $1 M_{\odot}$, $1.2 M_{\odot}$, $1.5 M_{\odot}$, $2 M_{\odot}$, $2.5 M_{\odot}$, $3 M_{\odot}$ и $4 M_{\odot}$. Штриховыми линиями ограничены значения эффективной температуры 3200-3350 К и светимости 1400 - $2200 L_{\odot}$ для красного гиганта V520 And. Масса звезды на стадии, обозначенной кружком, равна $0.6 M_{\odot}$, треугольником — $0.7 M_{\odot}$, ромбом — $0.9 M_{\odot}$, квадратом — $1 M_{\odot}$, звездочкой — $1.3 M_{\odot}$.

позволяют классифицировать V520 And как симбиотическую звезду с аккреционным диском вокруг горячего компонента. Светимость диска $< 10L_{\odot}$.

4.3 2MASS J21012803+4555377

До недавнего времени звезда 2MASS J21012803+4555377 рассматривалась как долгопериодическая переменная с характерным временем переменности блеска около 486 суток [177; 178]. Однако в работе [120], основанной на фотометрических и астрометрических данных обзора Gaia DR3 [179], эта звезда впервые была выделена как кандидат в симбиотические звезды.

Спектральные наблюдения были выполнены 11 января 2025 г. на двух инструментах: на спектрографе ТДС с низким разрешением и на спектрографе высокого разрешения SHEF (разрешающая способность $R \approx 50000$). Достаточное отношение сигнал к шуму на SHEF было достигнуто лишь в красной области спектра вблизи линии $H\alpha$. Фотометрические наблюдения были проведены 12 января 2025 г. на RC600 КГО ГАИШ, также 5 апреля 2026 г. был получен мониторинг в полосе B на телескопе Цейсс-2 КАС ГАИШ МГУ.

Полученные оценки блеска 2MASS J21012803+4555377 составили: $V = 16.635$, $Rc = 14.056$, $Ic = 12.25$. Фликкер-эффект в полосе B не был зарегистрирован, точность фотометрии составила 0.15 mag. Относительно низкая точность связана со слабостью звезды в полосе B .

Представленный на рис. 4.14 спектр объекта демонстрирует признаки, характерные для симбиотических звезд. На фоне непрерывного спектра холодного компонента, в котором заметны молекулярные полосы (в частности, TiO $\lambda 7050$), регистрируется эмиссионный спектр, включающий линии ионов с высокими потенциалами ионизации (He II, [Fe VII] и другие). Кроме того, в спектре присутствует широкая эмиссионная особенность на длине волны 6825 Å. Известно, что эта особенность обусловлена линией рамановского рассеяния O VI [180]. К настоящему времени данный признак наблюдался исключительно у симбиотических звезд и служит важным критерием, позволяющим надежно отличать их от объектов других типов [117]. Следовательно, 2MASS J21012803+4555377 должна быть классифицирована как симбиотическая звезда.

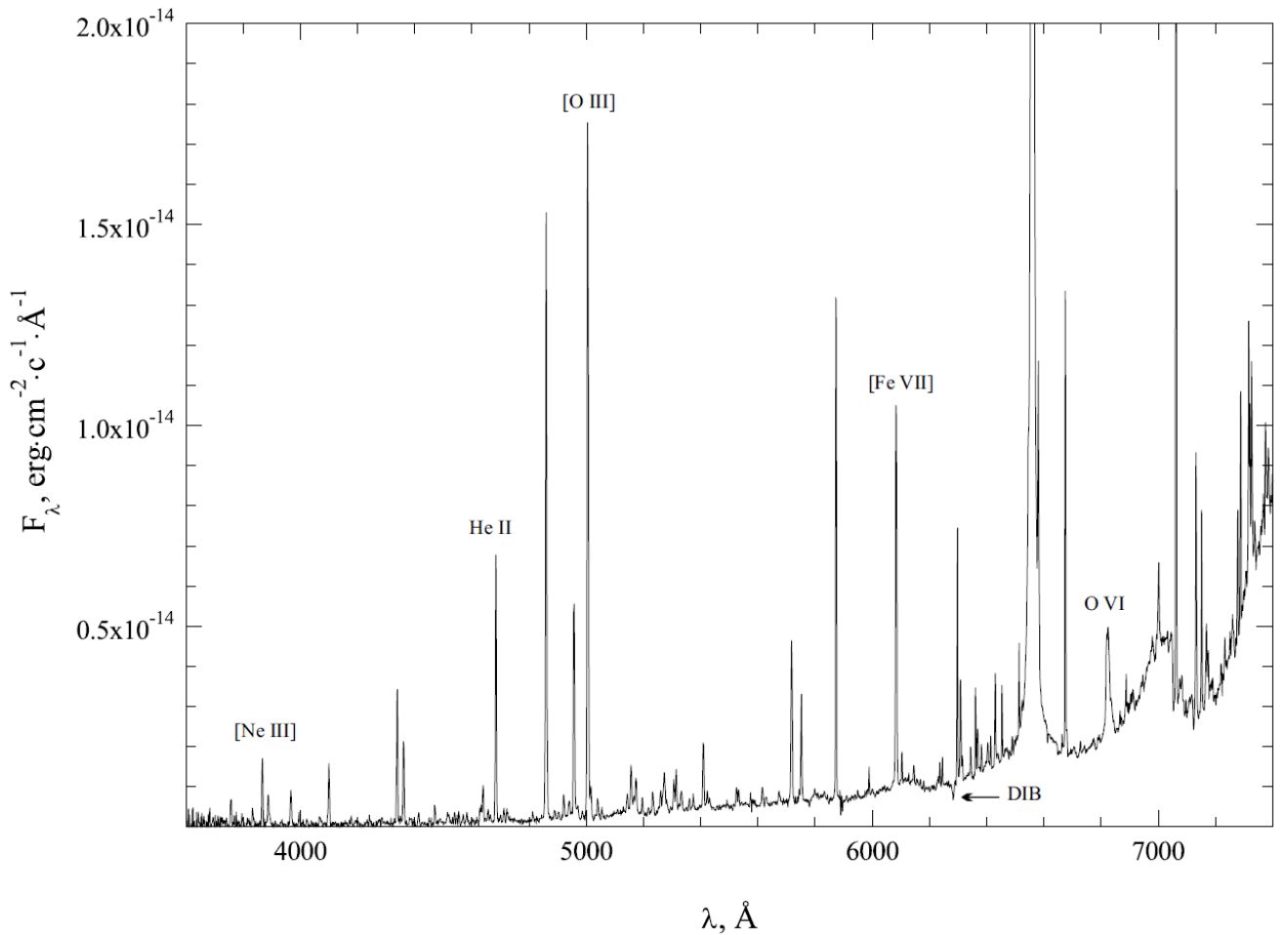


Рисунок 4.14 — Спектр 2MASS J21012803+4555377 полученный 11 января 2025 г.

По линии $\text{H}\alpha$ в спектре высокого разрешения измерена лучевая скорость 2MASS J21012803+4555377, составившая $V_r = -121.7 \pm 0.5$ км/с. Профиль линии является однокомпонентным и хорошо аппроксимируется функцией Фойгта с $\text{FWHM} = 3.1 \text{ \AA}$.

На рис. 4.15 представлены кривые блеска объекта, полученные спутником Gaia в период с 2015 по 2017 годы в фотометрических полосах B_p , G и R_p [179]. Видно, что в полосе B_p значимой переменности не наблюдается, тогда как в полосах G и R_p регистрируется переменность с амплитудой ~ 1.5 mag и интервалом между максимумами около 488 суток. На восходящем участке кривой присутствует «ступенька» — замедление роста блеска. Подобная особенность на фазовой кривой известна у некоторых мирид (см., например, [181], [182], [183]).

Если принять, что 488 суток соответствуют периоду пульсаций холодного компонента, то эта величина попадает в центральную область распределения периодов, характерных для мирид. Однако у классических мирид амплитуда переменности в оптическом диапазоне составляет не менее 2.5 mag [141] и, как правило, уменьшается с ростом длины волны [181]. Отсутствие заметных колебаний блеска 2MASS J21012803+4555377 в синей области, по-видимому, обусловлено доминированием излучения туманности (и, возможно, горячего компонента) в этом диапазоне, что также приводит к сглаживанию полос TiO (см. рис. 4.14). В красной области вклад туманности меньше, благодаря чему колебания блеска холодного компонента становятся заметны, хотя и с меньшей амплитудой.

На рисунке 4.16 представлено спектральное распределение энергии объекта 2MASS J21012803+4555377 после коррекции за межзвездное поглощение согласно закону [188] при $E(B - V) = 0.7$. Максимум излучения приходится на длину волны $\lambda \sim 2$ мкм. Измеренный болометрический поток составляет $F_{bol} = 5.7 \times 10^{-9}$ эрг/(см² с). Поскольку основная доля энергии испускается в инфракрасном диапазоне, величина F_{bol} слабо зависит от $E(B - V)$. При расстоянии до объекта 2.8 кпк светимость системы внутри пылевой оболочки, оценивается как $2130 L_{\odot}$. Такое значение характерно для симбиотических звезд.

Форма спектрального распределения энергии свидетельствует о наличии значительного инфракрасного избытка, обусловленного плотной пылевой оболочкой. По отношению потоков на участках, где излучением пыли можно пренебречь (см. рис. 4.16), можно оценить поглощение в оболочке: $\tau(1 \text{ мкм}) \sim 1.8$. Если предположить, что закон поглощения в оболочке близок к межзвезд-

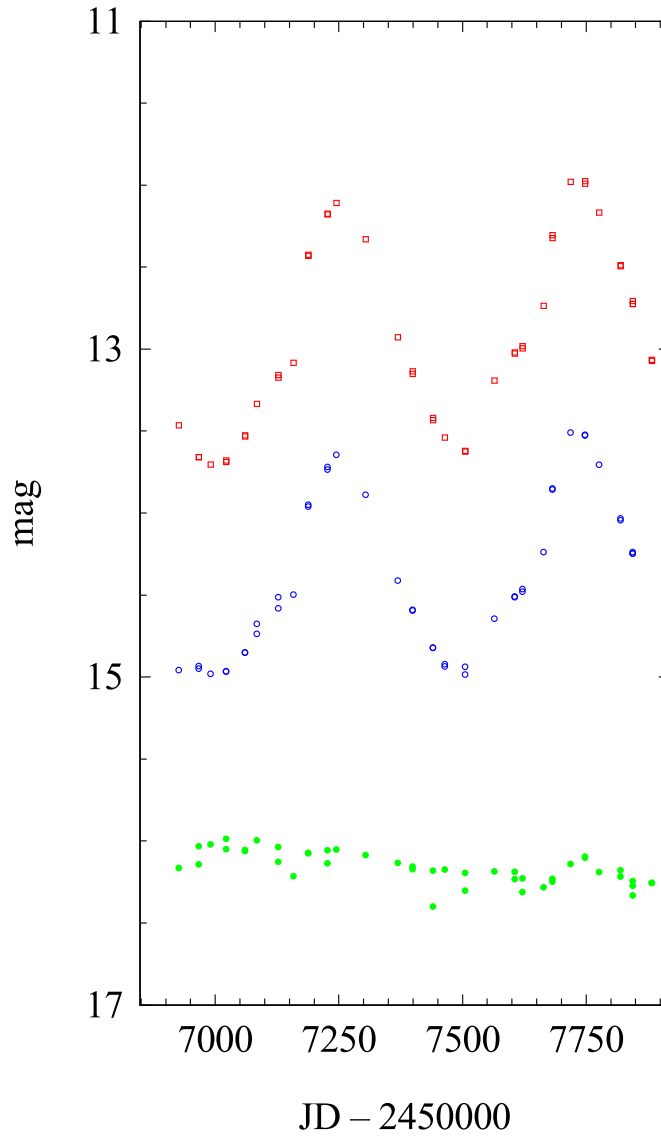


Рисунок 4.15 — Кривые блеска 2MASS J21012803+4555377 в Bp (зеленые точки), G (синие точки) и Rp (красные точки) полосах, полученные Gaia в 2015 – 2017.

ному, то $E(B - V) \approx 1.3$. Следовательно, суммарная величина избытка цвета достигает ≈ 2 mag.

Присутствие в спектре объекта интенсивной линии He II указывает на высокую температуру горячего компонента системы. Если предположить, что весь непрерывный спектр в окрестности этой линии формируется излучением туманности, то эквивалентная ширина $EW(He II) = 250 \text{ \AA}$ соответствует температуре горячего компонента $T_{hot} \approx 110000 \text{ K}$ (случай В рекомбинации). Полученное значение следует рассматривать как нижнюю оценку T_{hot} .

На рисунке 4.17 представлен спектр 2MASS J21012803+4555377 после коррекции за межзвездное поглощение с $E(B - V) = 2$ согласно закону из работы [188]. Анализ высоты молекулярной полосы TiO на длине волны 7054 \AA позво-

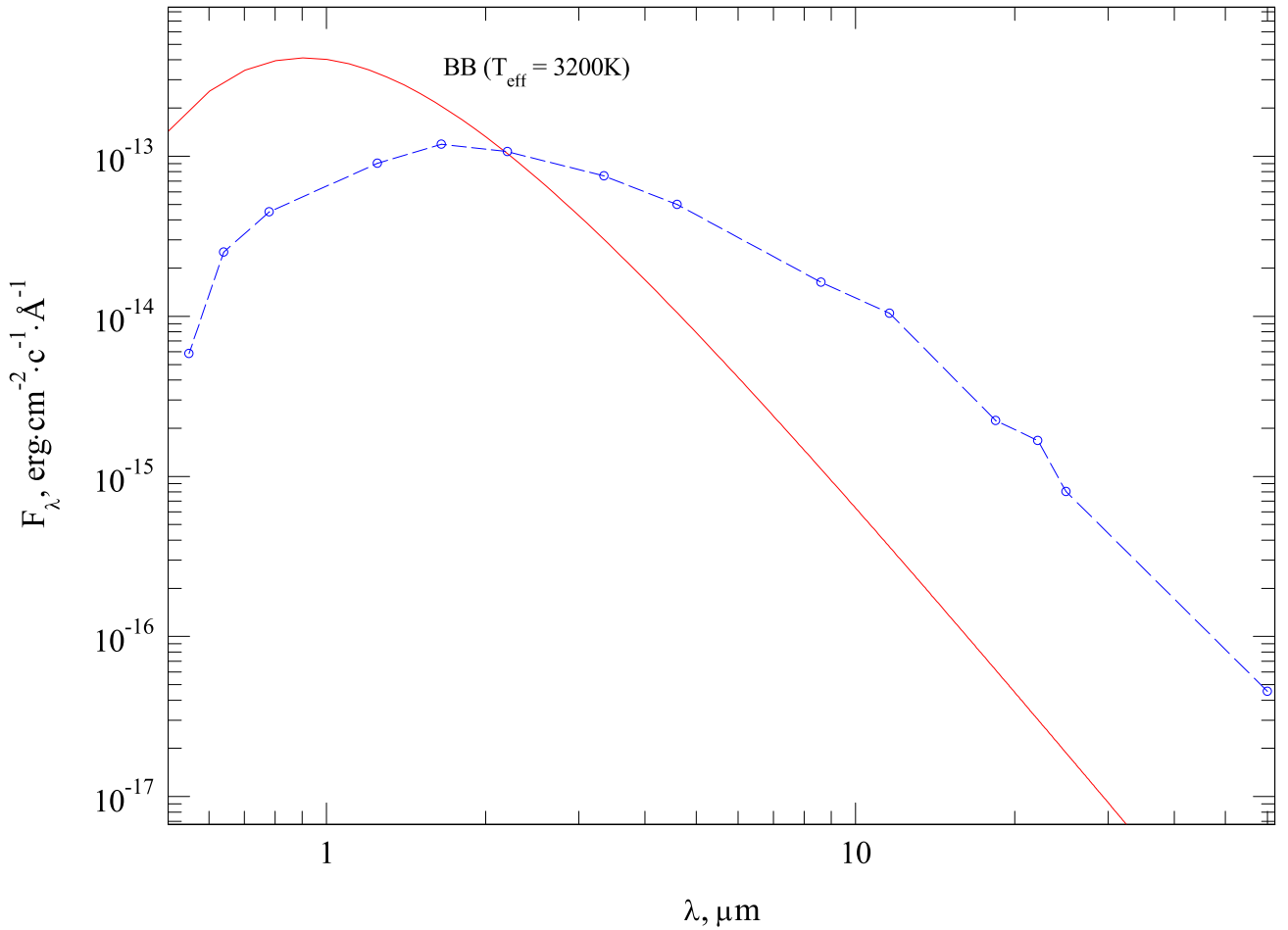


Рисунок 4.16 — Распределение энергии в спектре 2MASS J21012803+4555377, исправленное за межзвездное поглощение с $E(B - V) = 0.7$ — синяя кривая, излучение абсолютно черного тела с $T_{\text{eff}} = 3200$ К и тем же болометрическим потоком — красная кривая. Точки на синей кривой это данные нашей фотометрии в полосах V, Rc, Ic , данные 2MASS [184] в J, H, Ks , WISE [185], AKARI [186] и IRAS [187]

ляет заключить, что спектральный класс холодного компонента является более поздним, чем М3.

Нами была предпринята попытка качественного воспроизведения вида непрерывного спектра в оптическом диапазоне путем суммирования излучения красного гиганта спектрального класса М5 III [28] и непрерывного спектра туманности с электронной температурой $T_e = 15000$ К. Излучением горячего компонента (при $T_{\text{hot}} > 100000$ К) в этой спектральной области можно пренебречь. Как видно из рисунка, предложенное модельное распределение энергии удовлетворительно согласуется с наблюдаемым спектром 2MASS J21012803+4555377. Аналогичного соответствия можно достичь и при

использовании более холодного красного гиганта при небольшом изменении параметров системы.

При этом температура горячего компонента, определяемая по эквивалентной ширине линии He II, зависит от относительного вклада холодного компонента в непрерывный спектр на длине волны 4686 Å. Если вклад холодного компонента в суммарный поток составляет 50%, то оценка T_{hot} возрастает до ~ 140000 K

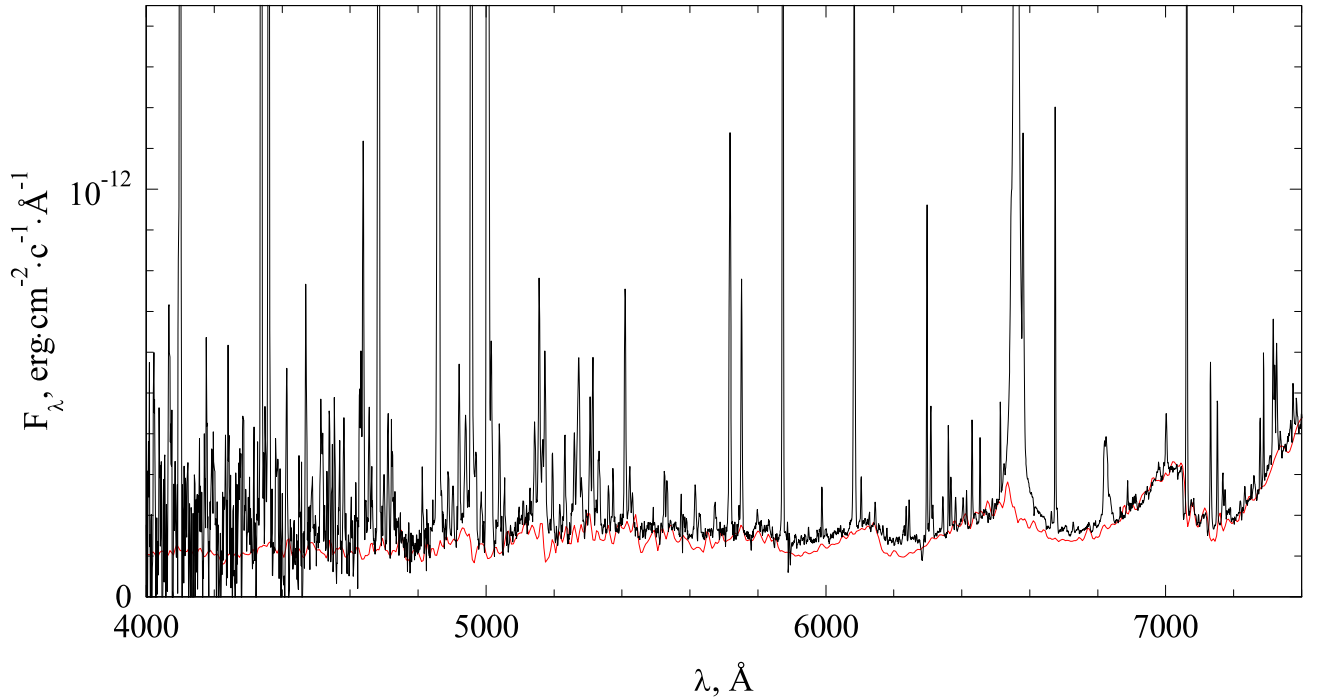


Рисунок 4.17 — Исправленный за поглощение в межзвездной среде и околозвездной оболочке с суммарным $E(B - V) = 2$ спектр 2MASS J21012803+4555377 (черная линия) и суммарный спектр излучения красного гиганта M5 III и туманности с $T_e = 15000$ K в континууме (красная линия).

Спектр объекта 2MASS J21012803+4555377, а также его распределение энергии в инфракрасной области, демонстрируют все признаки, характерные для симбиотической звезды D-типа. К их числу относятся: молекулярные полосы TiO, интенсивные эмиссионные линии (H I, [O III], [Ne III], He II и другие), линия рамановского рассеяния O VI $\lambda 6825$, а также значительный избыток инфракрасного излучения.

На основе спектра, наблюдаемого в эпоху, близкую к максимуму блеска, были оценены физические параметры компонентов системы: спектральный класс холодного компонента более поздний, чем M3 III, светимость источников, расположенных внутри пылевой оболочки, при расстоянии до объекта 2.8 кпк

$\sim 2130L_{\odot}$, температура горячего компонента, оцененная по линии He II $\lambda 4686$, не менее 110000 К.

4.4 AS 357

В работе [120], в которой 2MASS J21012803+4555377 была выделена в качестве кандидата в симбиотические звезды, также среди кандидатов присутствует звезда AS 357 (\equiv V469 Vul).

Впервые наличие сильной эмиссионной линии $H\alpha$ в спектре этой звезды было зафиксировано в работе [73]. AS 357 вошла в каталог Be-звезд [189], в котором отсутствует указание на ее спектральный класс, но отмечено наличие эмиссионной линии $H\alpha$. В последующие годы объект неоднократно включался в различные обзоры звезд с эмиссионными линиями [190; 191], а также в каталоги OB-звезд [192]. Согласно данным каталога Gaia DR3 [179] и ОКПЗ-5.1 [141], рассматриваемая звезда классифицируется как долгопериодическая переменная с эффективной температурой порядка 4000 К.

Фотометрические исследования AS 357 выполнялись на телескопе Цейсс-2 в фотометрических полосах U , B , V , Rc , Ic . Полученные кривые блеска представлены на рис. 4.18.

С целью поиска быстрой переменности блеска 18 февраля 2025 г. был выполнен мониторинг AS 357 в полосе B продолжительностью 45 минут. Анализ полученной кривой блеска не выявил наличия фликкер-эффекта.

Спектральные наблюдения низкого разрешения были проведены 12 февраля и 10 июня 2025 г. с использованием спектрографа ТДС [40] 2.5-м. телескопа КГО ГАИШ МГУ.

Величина межзвездного покраснения в направлении на AS 357 оценивалась нами по картам, представленным в работе [162], с учетом расстояния до звезды, составляющего 5650 пк [193], избыток цвета $E(B - V) = 0.42$. Коррекция спектров за межзвездное поглощение выполнялась по формулам из работы [188].

В спектре AS 357 (рис. 4.19) на фоне континуума холодной звезды с молекулярными полосами, регистрируются эмиссионные линии. Присутствие среди них линий ионов с высокими потенциалами ионизации (в частности, [O II],

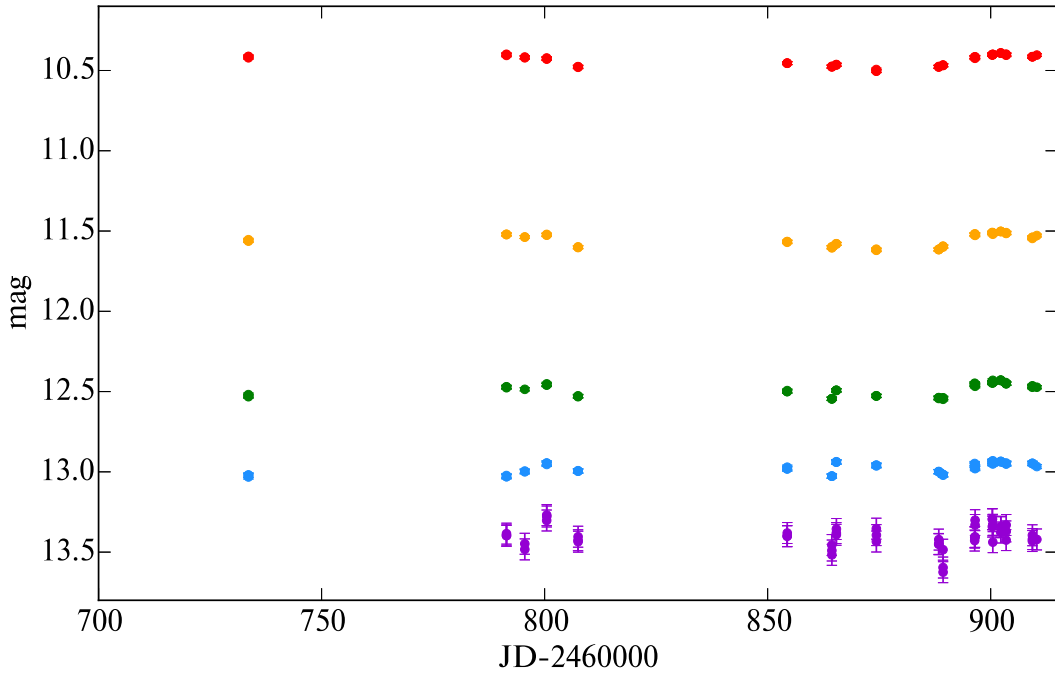


Рисунок 4.18 — Кривые блеска AS 357 в полосах (сверху вниз) I_c , R_c , V , B фотометрической системы Джонсона-Казинса и U в инструментальной системе, полученные на телескопе Цейсс-600 КАС ГАИШ МГУ в 2025 г.

[O III], He II) позволяет классифицировать данный объект как симбиотическую звезду.

В спектре холодного компонента системы AS 357 присутствуют молекулярные полосы TiO (в частности, на длинах волн $\lambda\lambda 5451$, 7054 и другие). Однако рабочий диапазон спектрографа ТДС, не включает всех полос, традиционно используемых для спектральной классификации холодных компонентов симбиотических звезд. В связи с этим определение спектрального класса объекта проводилось путем аппроксимации наблюдаемого спектра модельным распределением энергии (рис. 4.20). Модель строилась как сумма следующих составляющих: излучение красного гиганта, горячего компонента, непрерывный спектр туманности и дополнительный источник излучения. В качестве спектров красных гигантов использовались данные из работы [28]. Наилучшее согласие модельного спектра с наблюдениями было достигнуто для красного гиганта спектрального класса M3.

По данным из каталогов в VizieR было построено распределение энергии в спектре AS 357 (рис. 4.21) в широком диапазоне длин волн. В полосах J , H и K_s распределение энергии AS 357 совпадает со спектром красного гиганта, вклад остальных компонентов в этом диапазоне незначителен.

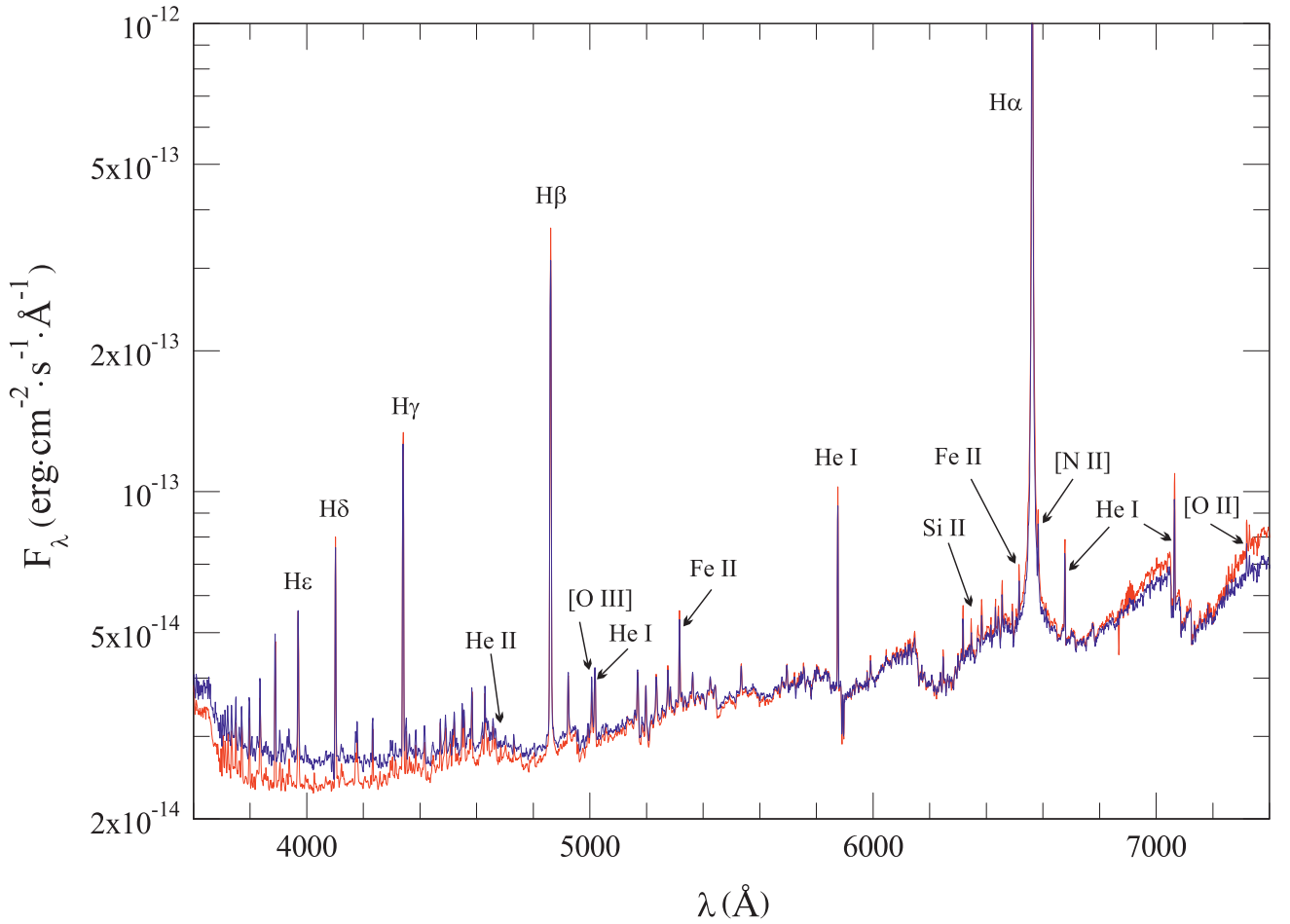


Рисунок 4.19 — Спектры AS 357, полученные 12.02.2025 (красная линия) и 10.06.2025 (синяя линия).

Согласно данным каталога 2MASS [184], звездные величины объекта составляют $J = 8.580 \pm 0.029$, $K_s = 7.261 \pm 0.021$, а показатель цвета $J - K_s = 1.32$. После коррекции за межзвездное покраснение с избытком цвета $E(B - V) = 0.42$ получаем исправленное значение $(J - K_s)_0 = 1.10$, что соответствует спектральному классу M3 III [194]. Используя болометрическую поправку $BC_K = 2.80$ [195] и принимая расстояние до AS 357 равным 5650 пк, находим абсолютную болометрическую звездную величину холодного компонента $M_{bol} = -3.7 \pm 0.2$ mag, а его светимость — 2500–3400 L_\odot . Полученное значение также соответствует III классу светимости.

Для оценки массы и радиуса холодного компонента с помощью программного пакета MESA [176] были построены эволюционные треки для звезд солнечной металличности с начальными массами от 1 до 4 M_\odot (рис. 4.22). Холодный компонент AS 357 представляет собой красный гигант спектрального класса M3, чья эффективная температура, согласно [175], лежит в диапазоне 3500–3600 K при светимости $L = 2500 - 3400 L_\odot$. Из эволюционных треков следу-

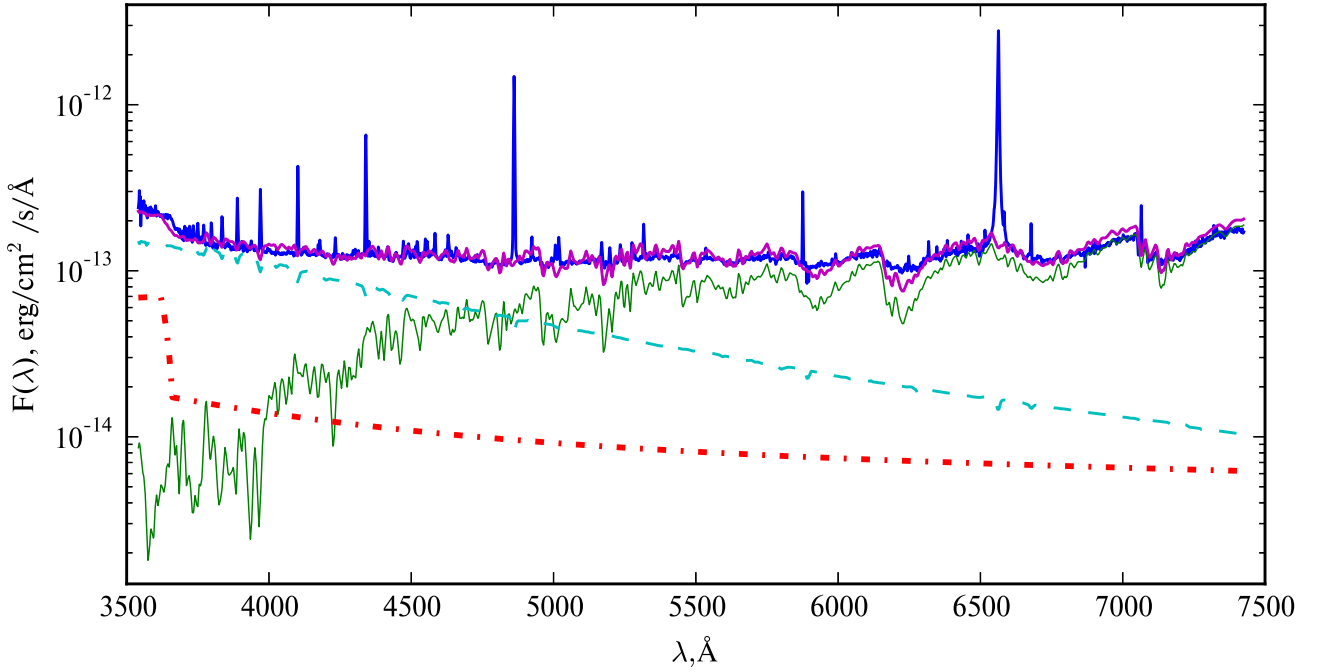


Рисунок 4.20 — Исправленные за межзвездное покраснение спектр AS 357, полученный 10.06.2025 (синяя линия), и модельный спектр симбиотической системы (фиолетовая линия). Компоненты модельного спектра: зеленая линия — излучение красного гиганта M3 III, голубая линия — излучение «теплого» компонента (звезда O8 III), красная линия — сумма излучения туманности с $T_e = 10000$ K и горячего компонента с $T_h = 55000$ K.

ют оценки параметров холодного компонента: его масса составляет $1.9 - 2.5 M_{\odot}$, а радиус — $130 - 150 R_{\odot}$.

Как следует из рис. 4.21, объект AS 357 может быть отнесен к S-типу симбиотических звезд, то есть к системам, у которых отсутствует избыток инфракрасного излучения. Спектральное распределение энергии в ближнем и среднем ИК диапазоне хорошо аппроксимируется излучением абсолютно черного тела с эффективной температурой $T_{eff} \approx 3560$ K, что соответствует спектральному классу M3 III.

AS 357 демонстрирует богатый эмиссионный спектр. В нем присутствуют линии H I, He I, Fe II, дублет [O II] $\lambda 7320, \lambda 7330$, [O III] $\lambda 5007$, Si II $\lambda 6347$, [N II] $\lambda 6584$ и другие. В спектре также присутствует слабая линия He II $\lambda 4686$, тогда как линии ионов с более высокими потенциалами ионизации отсутствуют. Это позволяет оценить эффективную температуру горячего компонента как $T_{hot} \approx 55000$ K [165]. Относительно низкая температура горячего компонента, а также бальмеровский декремент ($H\gamma/H\beta = 0.35 \pm 0.02$, $H\delta/H\beta = 0.20 \pm 0.04$) указывают на невысокую электронную температуру туманности: $T_e \approx 10000$ K.

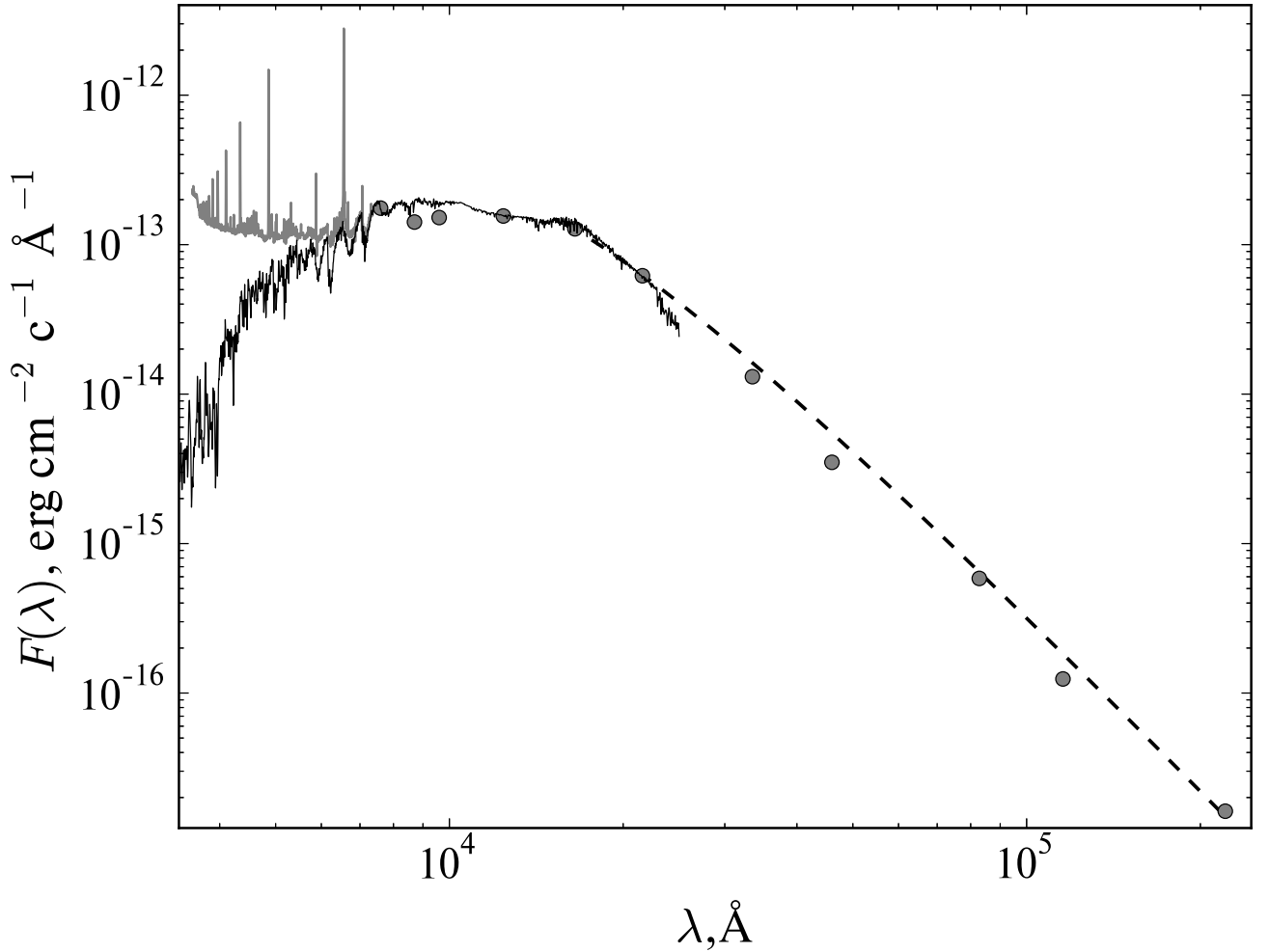


Рисунок 4.21 — Спектр (серая линия) и потоки в ближнем и среднем ИК-диапазоне по данным VizieR (серые точки) AS 357, исправленные за межзвездное покраснение, спектр красного гиганта M3 (черная линия) [24] и спектр абсолютно черного тела с $T_{eff} \approx 3560$ К — штриховая линия.

Как видно из рис. 4.20, суммарного вклада туманности, горячего и холодного компонентов недостаточно для описания наблюдаемого распределения энергии в непрерывном спектре, особенно в коротковолновой области. Для объяснения этого избытка излучения необходим так называемый «теплый» компонент, который может быть аккреционным диском (см., например, [69; 74; 170; 196] и другие работы).

На рис. 4.20 представлен пример модельного спектра AS 357, где в качестве дополнительного источника излучения использована звезда спектрального класса O8 III. Следует отметить, что в рассматриваемой области излучение звезды в первом приближении можно заменить излучением абсолютно черного тела. Как видно из рисунка, модельный и наблюдаемый спектры хорошо сов-

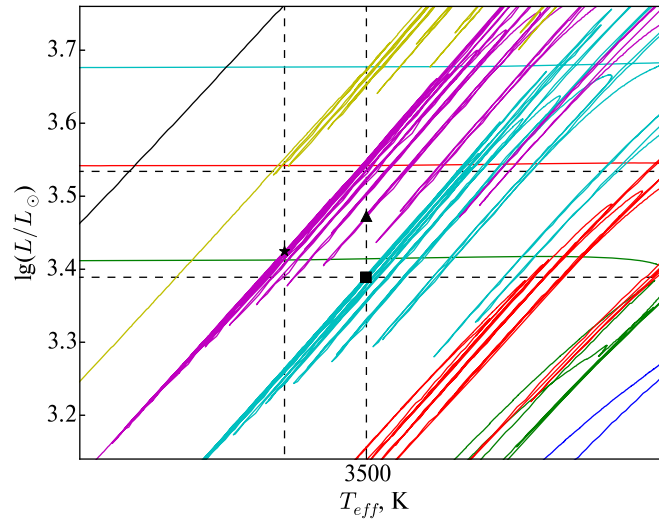


Рисунок 4.22 — Эволюционные треки звезд с солнечной металличностью и начальными массами (снизу-вверх) $1 M_{\odot}$, $1.2 M_{\odot}$, $1.5 M_{\odot}$, $2 M_{\odot}$, $2.5 M_{\odot}$, $3 M_{\odot}$ и $4 M_{\odot}$. Штриховыми линиями ограничены значения эффективной температуры 3500-3600 К и светимости 2500-3400 L_{\odot} . Масса звезды и радиус на стадии, обозначенной треугольником, равны $2.1 M_{\odot}$ и $148 R_{\odot}$, звездочкой — $2.5 M_{\odot}$ и $133 R_{\odot}$, квадратом — $1.9 M_{\odot}$ и $135 R_{\odot}$.

падают. Светимость дополнительного источника в данном случае составляет около $1000L_{\odot}$.

На рис. 4.23 приведена кривая блеска AS 357, построенная нами методом апертурной фотометрии по данным ZTF, полученным в период с 2018 по 2024 год в полосе g' [197]. На кривой отчетливо видны колебания блеска с полной амплитудой ~ 0.4 mag и периодом около 850 суток. Подобная форма кривой блеска у симбиотических звезд может быть обусловлена несколькими причинами: орбитальным движением (затмения компонентов системы или туманности), эллипсоидальной формой приливо деформированного холодного компонента (в этом случае орбитальный период вдвое превышает период переменности блеска) либо собственной переменностью красного гиганта. Поскольку в данном случае речь идет о коротковолновой области спектра (центральная длина волны фильтра g' составляет 0.48 мкм), где вклад излучения холодного компонента невелик (см. рис. 4.20), наблюдаемая переменность, по-видимому, связана с орбитальным движением, а обнаруженный период является орбитальным периодом системы. В этом случае моменты минимумов блеска $JD_{min} = 2457020 + 848E$, где E — номер орбитального цикла. В пользу этого предположения свидетельствует также изменение спектров. Первый спектр (красная линия на рис. 4.19) был получен на фазе подъема к максимуму

блеска ($\varphi = 0.36$), а второй — в максимуме блеска ($\varphi = 0.50$). Максимальные различия наблюдаются в коротковолновой области спектра, где они превышают 10%, тогда как в длинноволновой части изменения выражены слабее (возможно, они связаны с собственной переменностью красного гиганта). Период 850 суток хорошо укладывается в диапазон известных орбитальных периодов симбиотических звезд [198]. Однако окончательное подтверждение того, что эта величина действительно является орбитальным периодом системы, возможно только после получения кривой лучевых скоростей.

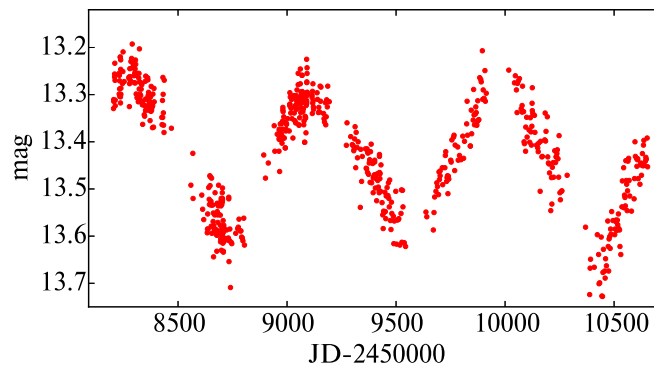


Рисунок 4.23 — Кривая блеска AS 357, полученная на телескопе ZTF в 2018–2024 гг. в полосе g .

Помимо долгопериодической переменности, система демонстрирует нерегулярные изменения блеска на коротких временных масштабах. Эта компонента заметна на кривой блеска рис. 4.23 в виде шума с характерной амплитудой ≈ 0.05 mag, а также на наших кривых блеска (см. рис. 4.18) с примерно такой же полуамплитудой. На интервале наблюдений протяженностью около 200 суток зависимости амплитуды этой переменности от длины волны не обнаружено.

Представленные в нашей работе спектральные данные позволяют однозначно классифицировать AS 357 как симбиотическую звезду: в ее спектре присутствуют как молекулярные полосы TiO, характерные для красных гигантов, так и эмиссионные линии, типичные для планетарных туманностей. Отсутствие избытка инфракрасного излучения в соответствии с принятой ИК-классификацией симбиотических звезд дает основание отнести данную систему к S-типу.

Следует отметить, что эмиссионный линейчатый спектр AS 357 содержит линии, характерные для Be и B[e]-звезд [175], на чем, вероятно, и основывались ранние классификации объекта как B-звезды [189; 192]. Кроме того, выделенный нами дополнительный источник излучения (возможно, аккреционный

диск) по своему распределению энергии напоминает звезду раннего спектрального класса. Однако ключевым отличием является присутствие в спектре достаточно интенсивных эмиссионных линий He I, а также слабой, но заметной линии He II $\lambda 4686$. Более того, в распределении энергии в ближнем и среднем ИК-диапазоне не наблюдается характерного для V[e]-звезд ИК-избытка, обусловленного излучением горячей пыли. Наоборот, оно хорошо описывается излучением холодного компонента системы (см. рис. 4.21). Совокупность этих признаков позволяет окончательно закрыть вопрос о классификации AS 357 как Ve-звезды и уверенно отнести её к классу симбиотических звезд.

Наблюдаемое распределение энергии в спектре AS 357 характерно для некоторых классических симбиотических звезд в фазе вспышки (см., например, [74]). Таким образом, возможно, AS 357 находится в активном состоянии. Это предположение косвенно подтверждается увеличением блеска в начале 2025 года на ~ 1 mag. Продолжение наблюдений позволит уточнить характер вспышечной активности системы.

Интересным результатом является полученная нами приблизительная оценка массы холодного компонента системы — около $2M_{\odot}$. В этом случае начальная масса горячего компонента, который успел пройти стадию красного гиганта раньше, должна была превышать эту величину (если исключить вероятность обмена массой в столь долгопериодической системе). Для надежного определения параметров системы необходимо получение кривой лучевых скоростей и дальнейшие фотометрические наблюдения.

* * *

Была подтверждена симбиотическая природа 4 кандидатов: CSS 1102, V520 And, 2MASS J21012803+4555377 и AS 357. У CSS 1102 и V520 And нами впервые был зарегистрирован фликкер-эффект.

Долгое время звезда CSS 1102 классифицировалась как одиночная S-звезда, однако фотометрические и спектральные наблюдения позволили установить ее симбиотическую природу. Спектральные наблюдения на 2.5-метровом телескопе показали, что в красной области спектр CSS 1102 практически идентичен спектру одиночной S-звезды HD64332, что позволило классифицировать холодный компонент как звезду типа S4.5/2 с температурой около 3400 K и оценить расстояние до системы в 5 кпк. Эмиссионный спектр CSS 1102 достаточно бедный, в основном видны линии бальмеровской серии. Бальмеровский декремент

показывает, что эмиссионные линии водорода образуются именно в туманности, а не в атмосфере холодной звезды. Дополнительными аргументами в пользу симбиотической природы CSS 1102 стали присутствие линий нейтрального гелия He I и слабых запрещенных линий [Ne III]. Так как линии ионов с высокими потенциалами ионизации (например, He II $\lambda 4686$) не были зарегистрированы, температура горячего компонента составляет примерно 40000–55000 К. У CSS 1102 отсутствует ИК-избыток, поэтому она относится к S-типу симбиотических звезд (без пылевой оболочки). Избыток излучения в синей и ультрафиолетовой областях спектра был объяснен наличием аккреционного диска со светимостью $< 450L_{\odot}$ вокруг горячего компонента. Также у CSS 1102 был зарегистрирован фликкер-эффект с амплитудой 0.1 mag в полосе *B*, что соответствует относительным изменениям потока от диска около 30%.

Симбиотическая природа V520 And была заподозрена в работе [117] на основе анализа данных ASAS-SN, показателей цвета для выделения красных гигантов и ультрафиолетовых данных GALEX. Для подтверждения симбиотической природы V520 And нами были проведены спектральные наблюдения. Зарегистрированные эмиссионные линии водорода, He I, Fe II, [O III] $\lambda 5007$ и [Ne III] $\lambda 3869$, а также избыток излучения около бальмеровского скачка на фоне спектра красного гиганта подтверждают симбиотическую природу V520 And. Исчезновение эмиссионных линий и ультрафиолетового избытка в спектре от 12 июня 2024 года позволило подтвердить богатый эмиссионный спектр в системе: вычитание из спектра, когда эмиссионный спектр был наиболее заметен, спектра, в котором почти все эмиссионные линии исчезли, позволило выделить переменный эмиссионный спектр с линиями H I, He I, Fe II, бальмеровским скачком и слабыми линиями [O III], [Ne III] и He II $\lambda 4686$.

Фотометрический мониторинг 14 октября 2023 г. показал наличие быстрой переменности блеска в полосе *B* с амплитудой 0.08 mag, а спектральный мониторинг 4 декабря 2023 г. выявил переменность эквивалентной ширины линий H α , H β (8–10%) и He I (около 30%). Спектры высокого разрешения показали двугорбую структуру профиля линии H α с расстоянием между пиками около 100 км/с и абсорбционным провалом до уровня континуума, что может объясняться либо поглощением в веществе ветра холодного компонента, либо присутствием аккреционного диска, скорость на внешней границе которого составляет 50–60 км/с.

Наличие аккреционного диска подтверждается моделированием бальмеровского скачка: при температуре горячего компонента около 50000 К и

электронной температуре туманности 10000 К расчетный скачок оказывается слишком большим, но он замывается излучением аккреционного диска со светимостью $2\text{--}10 L_{\odot}$.

Анализ распределения энергии в спектре в инфракрасном диапазоне показал отсутствие избытка, что позволяет отнести V520 And к S-типу симбиотических звезд. Таким образом, V520 And представляет собой симбиотическую звезду, состоящую из красного гиганта спектрального класса M5–M6 III, белого карлика с температурой около 50000 К, туманности с электронной температурой порядка 10000 К и аккреционного диска со светимостью $2\text{--}10 L_{\odot}$.

В спектре 2MASS J21012803+4555377 была зарегистрирована широкая эмиссионная линия на длине волны 6825 Å, обусловленная рамановским рассеянием O VI. К настоящему времени этот признак наблюдался исключительно у симбиотических звезд и служит надежным критерием для их отличия от объектов других типов. Кроме того, в спектре 2MASS J21012803+4555377 на фоне непрерывного спектра холодного компонента с молекулярными полосами TiO наблюдается эмиссионный спектр, включающий линии ионов с высокими потенциалами ионизации — He II, [Fe VII] и другие.

Анализ кривых блеска, полученных спутником Gaia за 2015–2017 годы, показал интересную особенность: в синей полосе Br значимой переменности не наблюдается, тогда как в полосах G и Rp регистрируется переменность с амплитудой около 1.5 mag и интервалом между максимумами около 488 суток. Отсутствие колебаний в синей области объясняется доминированием излучения туманности и горячего компонента в этом диапазоне, что сглаживает пульсации холодного гиганта. В красной области вклад туманности меньше, поэтому колебания блеска становятся заметными, хотя их амплитуда (1.5 mag) ниже типичной для классических мирид (не менее 2.5 mag). На восходящем участке кривой обнаружена «ступенька» — замедление роста блеска, известная у некоторых мирид. Спектральное распределение энергии 2MASS J21012803+4555377 показывает максимум излучения на 2 мкм, обусловленный плотной пылевой оболочкой, что позволяет отнести звезду к D-типу симбиотических звезд. Фотометрический мониторинг, полученный 5 апреля 2026 г., показал отсутствие у 2MASS J21012803+4555377 фликкер-эффекта.

На основе спектра, полученного в эпоху, близкую к максимуму блеска, оценены физические параметры компонентов. Спектральный класс холодного компонента M3–M5 III. Температура горячего компонента, определенная по эк-

вивалентной ширине линии He II $\lambda 4686$, составляет не менее 110000 K, а при учете возможного вклада холодного компонента в непрерывный спектр на этой длине волны оценка возрастает до ~ 140000 K.

В спектре AS 357 на фоне континуума холодной звезды с молекулярными полосами TiO регистрируются эмиссионные линии, среди которых присутствуют линии ионов с высокими потенциалами ионизации — [O II], [O III], He II, что позволяет однозначно классифицировать AS 357 как симбиотическую звезду. Отсутствие избытка ИК излучения дает основание отнести систему к S-типу симбиотических звезд. Многоцветная фотометрия, полученная на телескопе Цейсс-2 КАС ГАИШ, и данные ZTF за 2018–2024 гг. выявили два типа переменности. Долгопериодические колебания блеска с амплитудой около 0.4 mag и периодом примерно 850 суток, которые, по-видимому, связаны с орбитальным движением. А также нерегулярные изменения блеска на коротких временных масштабах с характерной амплитудой около 0.05 mag. Во время мониторинга 18 февраля 2025 г. в полосе *B* фликкер-эффект зарегистрирован не был.

Моделирование распределения энергии показало, что суммарного вклада холодного компонента, горячего компонента и туманности недостаточно для описания наблюдений в коротковолновой области. Для объяснения избытка излучения необходим дополнительный «теплый» компонент, который может быть аккреционным диском либо псевдофотосферой горячего компонента. Наблюдаемое распределение энергии в спектре AS 357 характерно для классических симбиотических звезд в фазе вспышки, что косвенно подтверждается увеличением блеска в начале 2025 г. примерно на 1 mag.

Заключение

Фликкер-эффект у симбиотических звезд — редкое малоизученное явление. Для изучения быстрой переменности требуются длительные фотометрические наблюдения с предельной точностью для наземных телескопов с диаметром зеркала 60 см — около 0.001 mag. Такая точность не достижима для телескопов с ручным управлением, необходима их автоматизация. Реализованная система управления малыми телескопами ГАИШ МГУ позволяет управлять телескопом, куполом, колесом фильтров и камерой. Было разработано три режима наблюдений: с оператором, находящимся в башне, с удаленным оператором, автоматические наблюдения. На телескопе Цейсс-2 с начала 2025 г. проводятся автоматические наблюдения. В ближайшее время планируется реализовать отслеживание погоды телескопами RC600, после этого они также смогут проводить наблюдения без участия оператора.

Основной проблемой для достижения точности в несколько тысячных звездной величины является неточное ведение. Из-за деформаций трубы телескопа и неточности часового ведения изображение звезды во время длительного мониторинга смещается по полю. При попиксельной коррекции на кадры «плоского поля» возникают ошибки, ухудшающие точность фотометрии более чем в 3 раза. Для достижения требуемой точности фотометрических наблюдений был реализован алгоритм субпиксельного ведения на основе получаемых научных кадров. В течение мониторинга новый полученный кадр сравнивается с опорным, считаются коррекции по осям прямого восхождения и склонения, ведение телескопа исправляется на полученные величины.

Симбиотические звезды — тесные двойные системы, состоящие из красного гиганта и горячего компонента. Фотометрические мониторинги для изучения фликкер-эффекта проводят в полосах U и B , в которых вклад красного гиганта наименьший. Но из-за неидеальности фильтров, существовании у них пропускания в красной области на уровне долей процента (красной утечки), красный гигант может давать дополнительное излучение, которое нужно учитывать, так как оно влияет на амплитуду быстрой переменности. Была разработана и применена методика для исправления красной утечки для кривых блеска симбиотических звезд.

До сих пор не разработано признанной методике по определению наличия быстрой переменности у симбиотических звезд, что осложняет сравнение результатов разных авторов. Для исследования фликкер-эффекта обычно анализируют спектр мощности кривой блеска. Для построения спектра мощности в работе использовался метод Ломба-Скаргла. Считалось, что быстрая переменность у объекта отсутствует, если на периодограмме Ломба-Скаргла не было пиков, для которых вероятность ложной тревоги $FAP < 0.0006\%$ (5σ). Если по периодограмме фликкер-эффект регистрировался, то для подтверждения его наличия проводился вейвлет-анализ. У симбиотических звезд существует два типа быстрой переменности: по типу промежуточных поляров и фликкер-эффект связанный с процессами в аккреционных дисках. У 26 симбиотических звезд и 12 кандидатов фликкер-эффект в наших наблюдениях не был зарегистрирован. У *Z And* была подтверждена известная ранее переменность по типу промежуточных поляров с амплитудой переменности 0.005 mag и периодом около 30 минут. У *T CrB*, *CH Cyg*, *SU Lyn* и *DQ Ser* был зарегистрирован фликкер-эффект. Было показано, что у *T CrB* амплитуда фликкер-эффекта не изменилась при начале сверхактивного состояния. Затем при падении блеска перед возможной вспышкой повторной новой амплитуда фликкер-эффекта упала в 3 раза, после возвращения блеска к уровню в сверхактивном состоянии амплитуда фликкер-эффекта возросла. Также в работе было показано, что отсутствие быстрой переменности у *CH Cyg* связано с выбросами пыли в системе. У *SU Lyn* фликкер-эффект был впервые зарегистрирован после его отсутствия в 2022-2025 г, в полосе *U* амплитуда составила 0.38 mag. У *DQ Ser* быстрая переменность блеска впервые была зарегистрирована в 2021 г. Амплитуда переменности составила 0.04–0.05 mag. В наблюдениях 2023–2024 г. фликкер-эффект у *DQ Ser* не был обнаружен.

В основном фликкер-эффект изучался у симбиотических звезд фотометрически. Спектральная быстрая переменность была зарегистрирована всего у нескольких объектов. Наши спектральные наблюдения показали, что у *T CrB* быстрая переменность регистрируется в линиях $H\alpha$, $H\beta$, $He I \lambda 5876$ и $He II \lambda 4686$. Амплитуда переменности в $H\alpha$, $H\beta$ в сверхактивном состоянии (2020 г.) не превышала 15%, в линиях гелия она значительно выше и составляла до 60%. В 2020 г. одновременно со спектральным мониторингом *T CrB* был проведен фотометрический мониторинг в полосе *B*. Были получены временные задержки между кривыми блеска в различных линиях: фликкер-эффект в по-

лосе B опережает изменения потока в линии $H\alpha$ на 228 ± 28 с, в линии $He I$ (5875.6 \AA) — на 500 ± 70 с, и в линии $He II$ (4686 \AA) — на 595 ± 28 с. Было показано, что изменения в линии $H\beta$ происходят синхронно с полосой B , однако, амплитуда переменности в $H\beta$ (и других более слабых линий в синей части спектра) недостаточна для объяснения полной амплитуды фликкер-эффекта в полосе B , что указывает на наличие дополнительного переменного источника в континууме, которым, по-видимому, является аккреционный диск. Амплитуда фликкер-эффекта в линии $He II$ в течение спектрального мониторинга T CrV, проведенный 8 июня 2023 г. в начале падения блеска системы, выросла в 2 раза по сравнению с мониторингами, проведенными в 2020 г., амплитуда быстрой переменности в линиях $H\alpha$, $H\beta$ — не изменилась. Также исчезли временные задержки между линиями водорода. Спектральный мониторинг в минимуме блеска системы перед возможной следующей вспышкой показал, что амплитуды переменностей линий $H\alpha$, $H\beta$, $He I \lambda 5876$ и $He II \lambda 4686$ выросли, как и в 2020 г. стали наблюдаться временные задержки.

У ΥGem фликкер-эффект был зарегистрирован в линиях $H\alpha$, $H\beta$ и $He I \lambda 5876$. Как и в случае T CrV амплитуда переменности в $He I$ значительно превышает амплитуду переменности в $H\alpha$ и $H\beta$, между кривыми блеска в линиях наблюдаются временные задержки. Большие амплитуды переменности в линиях гелия по сравнению с водородными линиями связаны с различным расстоянием областей возникновения линий от источника фликкер-эффекта и различной оптической глубиной. Временные задержки между переменностью в линиях $H\alpha$ и $H\beta$ вызваны сложной структурой туманности, области с разным бальмеровским декрементом находятся на разных расстояниях от источника переменности.

У LAMOST J122804.90-014825.7 и Миры быстрой переменности в спектральных линиях в работе обнаружено не было. У Миры наблюдалась быстрая переменность, но из-за отсутствия фотометрического мониторинга одновременно со спектральным или в близкие даты, нельзя уверенно утверждать, что у нее отсутствует быстрая переменность линий при фотометрическом фликкер-эффекте.

Нами была подтверждена симбиотическая природа 4 объектов: CSS 1102, V520 And, 2MASS J21012803+4555377 и AS 357. Из аппроксимации спектров моделью системы, состоящей из красного гиганта, горячего компонента, туманности и, если нужно, аккреционного диска, были получены параметры

компонентов систем. У CCS 1102 и V520 And был впервые зарегистрирован фликкер-эффект. Из спектрального мониторинга V520 And получены амплитуды фликкер-эффекта в линиях: в $H\alpha$ и $H\beta$ амплитуда составила 8 – 10%, в линии $He\ I \lambda 5876$ — ~ 30 %. Временных задержек зарегистрировано не было. Таким образом, продолжение спектральных и фотометрических наблюдений позволит выделить новые симбиотические звезды, зарегистрировать и изучить у них фликкер-эффект.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при модернизации телескопов и повышении точности калибровки фотометрических наблюдений в коротковолновых полосах. Автоматизация малых телескопов, которых в нашей стране достаточно много, позволяет получить предельную фотометрическую точность для наземных инструментов небольшого диаметра и использовать их для наблюдения за малоамплитудными явлениями, например, фликкер-эффектом или транзитами экзопланет, наравне с современными инструментами.

Увеличение числа известных симбиотических звезд и открытие их, в том числе, среди известных переменных способствует поиску недостающих звезд этого типа и разработке новой системы их классификации. Результаты исследований эффекта быстрой переменности в симбиотических звездах разного типа важны для понимания связи между фликкер-эффектом и параметрами компонентов системы, построения теоретических моделей переноса вещества в аккреционном диске и общих моделей этих двойных систем, работающих при различных состояниях активности горячего компонента.

Продолжение начатых в этой работе исследований позволит еще больше увеличить число известных систем и найти тот класс звезд, среди которых может скрываться основное число симбиотических звезд, находящихся в спящем состоянии. Системы с найденной быстрой переменностью должны стать основными кандидатами среди симбиотических звезд на исследования в рамках космических УФ миссий (например, «Спектр-УФ»).

Список литературы

1. *Cannon, A. J.* The spectrum of Nova Aquilae [Текст] / A. J. Cannon, H. Shapley // Annals of Harvard College Observatory. — 1923. — Т. 81, № 3. — С. 179—200.
2. *Akras, S.* Where are the missing symbiotic stars? Uncovering hidden symbiotic stars in public catalogues [Текст] / S. Akras // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2023. — Т. 519, № 4. — С. 6044—6054. — arXiv: [2301.08201](https://arxiv.org/abs/2301.08201) [[astro-ph.SR](#)].
3. On Symbiotic Stars and Type IA Supernovae [Текст] / S. J. Kenyon [и др.] // Astrophys. J. — 1993. — Т. 407. — С. L81.
4. *Lu, G.* Population synthesis for symbiotic stars with white dwarf accretors [Текст] / G. Lu, L. Yungelson, Z. Han // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2006. — Т. 372, № 3. — С. 1389—1406. — arXiv: [astro-ph/0608449](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0608449) [[astro-ph](#)].
5. *Magrini, L.* A Search for Symbiotic Stars in the Local Group [Текст] / L. Magrini, R. L. M. Corradi, U. Munari // Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution. Т. 303 / под ред. R. L. M. Corradi, J. Mikolajewska, T. J. Mahoney. — 2003. — С. 539. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
6. *Боярчук, А. А.* О двойственности Z And [Текст] / А. А. Боярчук // Астрономический журнал. — 1967. — Т. 44. — С. 1016.
7. *Berman, L.* The Spectrum and Temperature of T Coronae (Nova 1866) [Текст] / L. Berman // Publ. Astron. Soc. Pacific. — 1932. — Т. 44, № 261. — С. 318.
8. *Chakrabarty, D.* The Symbiotic Neutron Star Binary GX 1+4/V2116 Ophiuchi [Текст] / D. Chakrabarty, P. Roche // Astrophys. J. — 1997. — Т. 489, № 1. — С. 254—271. — arXiv: [astro-ph/9706048](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9706048) [[astro-ph](#)].
9. *Kuranov, A. G.* Symbiotic X-ray binaries systems in the galaxy [Текст] / A. G. Kuranov, K. A. Postnov // Astronomy Letters. — 2015. — Т. 41, № 3/4. — С. 114—127.

10. *Di Stefano, R.* The Progenitors of Type Ia Supernovae. II. Are they Double-degenerate Binaries? The Symbiotic Channel [Текст] / R. Di Stefano // *Astrophys. J.* — 2010. — Т. 719, № 1. — С. 474—482. — arXiv: [1004.1193 \[astro-ph.CO\]](#).
11. *Liu, Z.-W.* Type Ia Supernova Explosions in Binary Systems: A Review [Текст] / Z.-W. Liu, F. K. Ropke, Z. Han // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2023. — Т. 23, № 8. — С. 082001. — arXiv: [2305.13305 \[astro-ph.HE\]](#).
12. *King, A. R.* RS Ophiuchi: thermonuclear explosion or disc instability? [Текст] / A. R. King, J. E. Pringle // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 2009. — Т. 397, № 1. — С. L51—L54. — arXiv: [0905.0637 \[astro-ph.EP\]](#).
13. *Selwelli, P. L.* The Nature of the Recurrent Nova T Coronae Borealis: Ultraviolet Evidence for a White Dwarf Accretor [Текст] / P. L. Selwelli, A. Cassatella, R. Gilmozzi // *Astrophys. J.* — 1992. — Т. 393. — С. 289.
14. A PIONIER View on Mass-transferring Red Giants [Текст] / H. M. J. Boffin [и др.] // *The Messenger.* — 2014. — Т. 156. — С. 35—37. — arXiv: [1405.4648 \[astro-ph.SR\]](#).
15. *Perets, H. B.* Second generation planets [Текст] / H. B. Perets // *arXiv e-prints.* — 2010. — arXiv:1001.0581. — arXiv: [1001.0581 \[astro-ph.EP\]](#).
16. How Binary Stars affect Galactic Chemical Evolution [Текст] / C. A. Tout [и др.] // *Asymptotic Giant Branch Stars. Т. 191* / под ред. Т. Le Bertre, A. Lebre, C. Waelkens. — 1999. — С. 447. — (IAU Symposium).
17. *Jorissen, A.* The Link between Symbiotic Stars and Chemically Peculiar Red Giants (invited review talks) [Текст] / A. Jorissen // *Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution. Т. 303* / под ред. R. L. M. Corradi, J. Mikolajewska, T. J. Mahoney. — 2003. — С. 25. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
18. *Lyubarskii, Y. E.* Flicker noise in accretion discs [Текст] / Y. E. Lyubarskii // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 1997. — Т. 292, № 3. — С. 679—685.
19. *Шакура, Н. И.* Дискковая модель аккреции газа на релятивистскую звезду в тесной двойной системе [Текст] / Н. И. Шакура // *Астрономический журнал.* — 1972. — Т. 49. — С. 921.

20. *Shakura, N. I.* Black holes in binary systems. Observational appearance. [Текст] / N. I. Shakura, R. A. Sunyaev // *Astron. and Astrophys.* — 1973. — Т. 24. — С. 337—355.
21. *Lyubarskij, Y. E.* Eccentric Accretion Discs [Текст] / Y. E. Lyubarskij, K. A. Postnov, M. E. Prokhorov // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 1994. — Т. 266. — С. 583.
22. Accretion-induced variability links young stellar objects, white dwarfs, and black holes [Текст] / S. Scaringi [и др.] // *Science Advances.* — 2015. — Т. 1, № 9. — e1500686—e1500686. — arXiv: [1510.02471](https://arxiv.org/abs/1510.02471) [[astro-ph.HE](#)].
23. *Papadakis, I. E.* Frequency-dependent Time Lags in the X-Ray Emission of the Seyfert Galaxy NGC 7469 [Текст] / I. E. Papadakis, K. Nandra, D. Kazanas // *Astrophys. J.* — 2001. — Т. 554, № 2. — С. L133—L137. — arXiv: [astro-ph/0106175](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0106175) [[astro-ph](#)].
24. *Nowak, M. A.* Low-Luminosity States of the Black Hole Candidate GX 339-4. II. Timing Analysis [Текст] / M. A. Nowak, J. Wilms, J. B. Dove // *Astrophys. J.* — 1999. — Т. 517, № 1. — С. 355—366. — arXiv: [astro-ph/9812180](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9812180) [[astro-ph](#)].
25. BVI_c Observations and Search for Evolutionary Variations in the Cepheid V811 Oph Period [Текст] / L. N. Berdnikov [и др.] // *Astron. Rep.* — 2020. — Т. 64, № 4. — С. 310—318.
26. Astrometry.net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images [Текст] / D. Lang [и др.] // *Astron. J.* — 2010. — Т. 139, № 5. — С. 1782—1800. — arXiv: [0910.2233](https://arxiv.org/abs/0910.2233) [[astro-ph.IM](#)].
27. *astropy/photutils: 2.2.0* [Текст] / L. Bradley [и др.]. — Вер. 2.2.0. — 2025.
28. *Pickles, A. J.* A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å [Текст] / A. J. Pickles // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 1998. — Т. 110, № 749. — С. 863—878.
29. Atmospheric scintillation in astronomical photometry [Текст] / J. Osborn [и др.] // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 2015. — Т. 452, № 2. — С. 1707—1716. — arXiv: [1506.06921](https://arxiv.org/abs/1506.06921) [[astro-ph.IM](#)].

30. DONUTS: A Science Frame Autoguiding Algorithm with Sub-Pixel Precision, Capable of Guiding on Defocused Stars [Текст] / J. McCormac [и др.] // Publ. Astron. Soc. Pacific. — 2013. — Т. 125, № 927. — С. 548. — arXiv: [1304.2405 \[astro-ph.IM\]](#).
31. *Munari, U.* Characterizing the Photometric Response of the ANS Collaboration Monitoring Program [Текст] / U. Munari, S. Moretti // Baltic Astronomy. — 2012. — Т. 21. — С. 22–31.
32. The universal nature of accretion-induced variability: the rms-flux relation in an accreting white dwarf [Текст] / S. Scaringi [и др.] // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2012. — Т. 421, № 4. — С. 2854–2860. — arXiv: [1201.0759 \[astro-ph.SR\]](#).
33. *Belloni, T.* A Unified Description of the Timing Features of Accreting X-Ray Binaries [Текст] / T. Belloni, D. Psaltis, M. van der Klis // Astrophys. J. — 2002. — Т. 572, № 1. — С. 392–406. — arXiv: [astro-ph/0202213 \[astro-ph\]](#).
34. *Matthews, J. H.* Particle acceleration in radio galaxies with flickering jets: GeV electrons to ultrahigh energy cosmic rays [Текст] / J. H. Matthews, A. M. Taylor // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2021. — Т. 503, № 4. — С. 5948–5964. — arXiv: [2103.06900 \[astro-ph.HE\]](#).
35. Accretion-induced flickering variability among symbiotic stars from space photometry with NASA TESS [Текст] / J. Merc [и др.] // Astron. and Astrophys. — 2024. — Т. 683. — A84. — arXiv: [2312.16126 \[astro-ph.SR\]](#).
36. *Cousins, A. W. J.* VRI standards in the E regions [Текст] / A. W. J. Cousins // Memoirs of the Royal Astronomical Society. — 1976. — Т. 81. — С. 25.
37. The Sloan Digital Sky Survey Photometric System [Текст] / M. Fukugita [и др.] // Astron. J. — 1996. — Т. 111. — С. 1748.
38. The Pan-STARRS1 Surveys [Текст] / K. C. Chambers [и др.] // arXiv e-prints. — 2016. — arXiv:1612.05560. — arXiv: [1612.05560 \[astro-ph.IM\]](#).
39. Transient Double-Beam Spectrograph for the 2.5-m Telescope of the Caucasus Mountain Observatory of SAI MSU [Текст] / S. A. Potanin [и др.] // Astron. Lett. — 2020. — Т. 46, № 12. — С. 836–854. — arXiv: [2011.03061 \[astro-ph.IM\]](#).

40. Optical Spectroscopy of SRG/eROSITA Objects with 2.5-m Telescope at the Caucasus Mountain Observatory of the SAI MSU [Текст] / A. V. Dodin [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2020. — Т. 46, № 7. — С. 429—438.
41. ASTRONIRCAM—the infrared camera-spectrograph for the 2.5-m telescope of SAI Caucasian observatory [Текст] / A. E. Nadjip [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2017. — Т. 72, № 3. — С. 349—362. — arXiv: [1706.08959](https://arxiv.org/abs/1706.08959) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1706.08959)].
42. Photometric Operation Mode of the ASTRONIRCAM Camera [Текст] / A. M. Tatarnikov [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2023. — Т. 78, № 3. — С. 384—394.
43. *Tokunaga, A. T.* The Mauna Kea Observatories Near-Infrared Filter Set. II. Specifications for a New JHKL'M' Filter Set for Infrared Astronomy [Текст] / A. T. Tokunaga, D. A. Simons, W. D. Vacca // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. — 2002. — Т. 114, № 792. — С. 180—186. — arXiv: [astro-ph/0110593](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0110593) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0110593)].
44. *Шенаврин, В. И.* Поиск и исследования горячих околозвёздных пылевых оболочек [Текст] / В. И. Шенаврин, О. Г. Таранова, А. Э. Наджип // *Астрономический журнал*. — 2011. — Т. 88, № 1. — С. 34—85.
45. New Infrared Camera of the Caucasian Mountain Observatory of the SAI MSU: Design, Main Parameters, and First Light [Текст] / S. G. Zheltoukhov [и др.] // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2024. — Т. 79, № 1. — С. 97—106. — arXiv: [2404.01246](https://arxiv.org/abs/2404.01246) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/2404.01246)].
46. *Johnson, H. L.* The Absolute Calibration of the Arizona Photometry [Текст] / H. L. Johnson // *Communications of the Lunar and Planetary Laboratory*. — 1965. — Т. 3. — С. 73—77.
47. *VanderPlas, J. T.* Understanding the Lomb-Scargle Periodogram [Текст] / J. T. VanderPlas // *Astrophys. J. Suppl.* — 2018. — Т. 236, № 1. — С. 16. — arXiv: [1703.09824](https://arxiv.org/abs/1703.09824) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1703.09824)].
48. *Schuster, A.* On the investigation of hidden periodicities with application to a supposed 26 day period of meteorological phenomena [Текст] / A. Schuster // *Terrestrial Magnetism*. — 1898. — Т. 3, № 1. — С. 13.

49. *Lomb, N. R.* Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data [Текст] / N. R. Lomb // *Astrophys. and Space Sci.* — 1976. — Т. 39, № 2. — С. 447—462.
50. *Scargle, J. D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. [Текст] / J. D. Scargle // *Astrophys. J.* — 1982. — Т. 263. — С. 835—853.
51. *Edelson, R. A.* The Discrete Correlation Function: A New Method for Analyzing Unevenly Sampled Variability Data [Текст] / R. A. Edelson, J. H. Krolik // *Astrophys. J.* — 1988. — Т. 333. — С. 646.
52. *Dworetsky, M. M.* A period-finding method for sparse randomly spaced observations or “How long is a piece of string ?” [Текст] / M. M. Dworetsky // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 1983. — Т. 203. — С. 917—924.
53. *Schwarzenberg-Czerny, A.* On the advantage of using analysis of variance for period search. [Текст] / A. Schwarzenberg-Czerny // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 1989. — Т. 241. — С. 153—165.
54. *Stellingwerf, R. F.* Period determination using phase dispersion minimization. [Текст] / R. F. Stellingwerf // *Astrophys. J.* — 1978. — Т. 224. — С. 953—960.
55. *Gregory, P. C.* A New Method for the Detection of a Periodic Signal of Unknown Shape and Period [Текст] / P. C. Gregory, T. J. Loredo // *Astrophys. J.* — 1992. — Т. 398. — С. 146.
56. Using conditional entropy to identify periodicity [Текст] / M. J. Graham [и др.] // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 2013. — Т. 434, № 3. — С. 2629—2635. — arXiv: [1306.6664](https://arxiv.org/abs/1306.6664) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1306.6664)].
57. *Reimann, J. D.* Frequency Estimation Using Unequally-Spaced Astronomical Data. [Текст] : дис. ... канд. / Reimann James Dennis. — University of California, Berkeley, 1994.
58. *Schwarzenberg-Czerny, A.* Fast and Statistically Optimal Period Search in Uneven Sampled Observations [Текст] / A. Schwarzenberg-Czerny // *Astrophys. J.* — 1996. — Т. 460. — С. L107.

59. *Bretthorst, G. L.* Generalizing the Lomb-Scargle periodogram—the nonsinusoidal case [Текст] / G. L. Bretthorst // Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering. Т. 568 / под ред. A. Mohammad-Djafari. — AIP, 2001. — С. 246—251. — (American Institute of Physics Conference Series).
60. *Wang, Y.* Nonparametric Bayesian Estimation of Periodic Light Curves [Текст] / Y. Wang, R. Khardon, P. Protopapas // Astrophys. J. — 2012. — Т. 756, № 1. — С. 67. — arXiv: [1111.1315](https://arxiv.org/abs/1111.1315) [[cs.LG](#)].
61. Flexible and Scalable Methods for Quantifying Stochastic Variability in the Era of Massive Time-domain Astronomical Data Sets [Текст] / B. C. Kelly [и др.] // Astrophys. J. — 2014. — Т. 788, № 1. — С. 33. — arXiv: [1402.5978](https://arxiv.org/abs/1402.5978) [[astro-ph.IM](#)].
62. A comparison of period finding algorithms [Текст] / M. J. Graham [и др.] // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2013. — Т. 434, № 4. — С. 3423—3444. — arXiv: [1307.2209](https://arxiv.org/abs/1307.2209) [[astro-ph.IM](#)].
63. *Cumming, A.* The Lick Planet Search: Detectability and Mass Thresholds [Текст] / A. Cumming, G. W. Marcy, R. P. Butler // Astrophys. J. — 1999. — Т. 526, № 2. — С. 890—915. — arXiv: [astro-ph/9906466](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9906466) [[astro-ph](#)].
64. *Grossmann, A.* Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape [Текст] / A. Grossmann, J. Morlet // SIAM Journal on Mathematical Analysis. — 1984. — Т. 15, № 4. — С. 723—736.
65. *Ricker, N.* Wavelet functions and their polynomials [Текст] / N. Ricker // Geophysics. — 1944. — Т. 9, № 3. — С. 314—323.
66. *Marr, D.* Theory of Edge Detection [Текст] / D. Marr, E. Hildreth // Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing papers of a Biological character. Royal Society (Great Britain). — 1980. — Т. 207. — С. 187—217.
67. Symbiotic Nature of the Zirconium Star CSS 1102 [Текст] / N. A. Maslennikova [и др.] // Astronomy Letters. — 2022. — Т. 48, № 1. — С. 38—46.
68. *Sokoloski, J. L.* Discovery of a Magnetic White Dwarf in the Symbiotic Binary Z Andromedae [Текст] / J. L. Sokoloski, L. Bildsten // Astrophys. J. — 1999. — Т. 517, № 2. — С. 919—924. — arXiv: [astro-ph/9812294](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9812294) [[astro-ph](#)].

69. A New Activity Cycle of V1413 Aql [Текст] / A. Tatarnikova [и др.] // Galaxies. — 2025. — Т. 13, № 4. — С. 86.
70. Four states of the recurrent symbiotic nova V407 Cyg [Текст] / V. F. Esipov [и др.] // Astronomische Nachrichten. — 2013. — Т. 334, № 8. — С. 810.
71. *Merrill, P. W.* A Bright Line of Ionized Helium, $\lambda 4686$, in Three Stellar Spectra with Titanium Bands [Текст] / P. W. Merrill, M. L. Humason // Publ. Astron. Soc. Pacific. — 1932. — Т. 44, № 257. — С. 56.
72. *Herbig, G. H.* The Spectra of Five Irregular Variable Stars [Текст] / G. H. Herbig // Publ. Astron. Soc. Pacific. — 1950. — Т. 62, № 367. — С. 211.
73. *Merrill, P. W.* Measurements in the Combination Spectra of RW Hydrae, BF Cygni, and CI Cygni. [Текст] / P. W. Merrill // Astrophys. J. — 1950. — Т. 111. — С. 484.
74. Photometric and Spectrophotometric Observations of the Evolution of a Strong Outburst of the Classical Symbiotic Star YY Herculis [Текст] / A. A. Tatarnikova [и др.] // Astronomy Reports. — 2000. — Т. 44, № 3. — С. 190—201.
75. IR Photometry of the Symbiotic Star BF Cyg: Detection of the Red Giant's Ellipsoidal Brightness Variability [Текст] / B. F. Yudin [и др.] // Astronomy Reports. — 2005. — Т. 49, № 3. — С. 232—241.
76. Formation of a disk structure in the symbiotic binary AX Persei during its 2007-10 precursor-type activity [Текст] / A. Skopal [и др.] // Astron. and Astrophys. — 2011. — Т. 536. — A27. — arXiv: [1110.2801](https://arxiv.org/abs/1110.2801) [[astro-ph.SR](#)].
77. Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. III. First Orbits for Three S-Type Systems [Текст] / F. C. Fekel [и др.] // Astron. J. — 2001. — Т. 121, № 4. — С. 2219—2226.
78. *Sokoloski, J. L.* A search for rapid photometric variability in symbiotic binaries [Текст] / J. L. Sokoloski, L. Bildsten, W. C. G. Ho // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2001. — Т. 326, № 2. — С. 553—577. — arXiv: [astro-ph/0104031](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0104031) [[astro-ph](#)].

79. *Formigini, L.* Discovery of the 1.80 h spin period of the white dwarf of the symbiotic system BF Cyg [Текст] / L. Formigini, E. M. Leibowitz // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2009. — Т. 396, № 3. — С. 1507—1512. — arXiv: [0903.5157 \[astro-ph.SR\]](#).
80. *Downes, R. A.* Spectroscopic observations of H-alpha emission stars from the Stephenson and Stephenson-Sanduleak lists. [Текст] / R. A. Downes, C. D. Keyes // Astron. J. — 1988. — Т. 96. — С. 777—790.
81. *Munari, U.* Historical light curve and the 2016 outburst of the symbiotic star StHalpaha 169 [Текст] / U. Munari, M. Graziani, R. Jurdana-Sepic // Information Bulletin on Variable Stars. — 2016. — Т. 6176. — С. 1. — arXiv: [1607.06312 \[astro-ph.SR\]](#).
82. *Munari, U.* Studies of symbiotic stars. V. The dust-free yellow system He 2-467. [Текст] / U. Munari, L. M. Buson // Astron. and Astrophys. — 1992. — Т. 255. — С. 158—166.
83. *Murset, U.* Spectral classification of the cool giants in symbiotic systems [Текст] / U. Murset, H. M. Schmid // Astron. and Astrophys. Suppl. — 1999. — Т. 137. — С. 473—493.
84. *Arkhipova, V. P.* First flare of the yellow symbiotic star LT Del = He 2-467 [Текст] / V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, R. I. Noskova // Astronomy Letters. — 1995. — Т. 21, № 3. — С. 339—344.
85. Spectrum of the Yellow Symbiotic Star LT Delphini before, during, and after the 2017 Outburst [Текст] / N. P. Ikonnikova [и др.] // Astronomy Letters. — 2019. — Т. 45, № 4. — С. 217—226. — arXiv: [1904.11855 \[astro-ph.SR\]](#).
86. Details of the classification of symbiotic stars: the case of the symbiotic nova AG Peg [Текст] / A. A. Tatarnikova [и др.] // Baltic Astronomy. — 2016. — Т. 25. — С. 317—323.
87. *Boyarchuk, A. A.* Spectrophotometry of Ag Pegasi, 1964-1965 [Текст] / A. A. Boyarchuk // Astron. Zh. — 1966. — Т. 43. — С. 976.
88. FUSE Spectroscopic Analysis of the Slowest Symbiotic Nova AG Peg During Quiescence [Текст] / E. M. Sion [и др.] // Astrophys. J. — 2019. — Т. 874, № 2. — С. 178. — arXiv: [1902.10002 \[astro-ph.SR\]](#).
89. *Fernie, J. D.* The Period of AG Pegasi: Having Another Go. [Текст] / J. D. Fernie // Publ. Astron. Soc. Pacific. — 1985. — Т. 97. — С. 653—656.

90. *Zhekov, S. A.* An XMM-Newton observation of the symbiotic star AG Peg: the X-ray emission after the end of its 2015 outburst [Текст] / S. A. Zhekov, T. V. Tomov // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2018. — Т. 481, № 4. — С. 5156—5162. — arXiv: [1809.09015 \[astro-ph.SR\]](#).
91. HBHa 1704-05: a bright and newly discovered symbiotic star, currently undergoing an “hot-type” outburst [Текст] / U. Munari [и др.] // The Astronomer’s Telegram. — 2018. — Т. 11937. — С. 1.
92. The path to Z And-type outbursts: The case of V426 Sagittae (HBHA 1704-05) [Текст] / A. Skopal [и др.] // Astron. and Astrophys. — 2020. — Т. 636. — A77. — arXiv: [2003.10135 \[astro-ph.SR\]](#).
93. *Bensammar, S.* Infrared observations of Kuwano’s novalike object. [Текст] / S. Bensammar, M. Friedjung, P. Assus // Astron. and Astrophys. — 1980. — Т. 83. — С. 261—262.
94. *Shugarov, S.* Symbiotic Nova PU Vul – 33 Years of Observations [Текст] / S. Shugarov, D. Chochol, E. Kolotilov // Baltic Astronomy. — 2012. — Т. 21. — С. 150—156.
95. Spectroscopic and photometric observations of symbiotic nova PU Vul during 2009-2016 [Текст] / A. Tatarnikova [и др.] // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Т. 18, № 8. — С. 098. — arXiv: [1803.05739 \[astro-ph.SR\]](#).
96. *Tatarnikova, A. A.* Analysis of archive UV observations of the symbiotic nova PU Vul during its nebular stage and brightness minimum in 1993-1994 [Текст] / A. A. Tatarnikova, A. M. Tatarnikov // Astronomy Reports. — 2009. — Т. 53, № 11. — С. 1020—1031.
97. RS Oph - disappearance of optical flickering after the outburst [Текст] / R. Zamanov [и др.] // The Astronomer’s Telegram. — 2006. — Т. 832. — С. 1.
98. *Kohoutek, L.* HBV475: a New Peculiar Emission Object in Cygnus [Текст] / L. Kohoutek // Information Bulletin on Variable Stars. — 1969. — Т. 384. — С. 1.
99. *Munari, U.* A probable non-degenerate H-burning flash on the white dwarf of the symbiotic slow nova V1329 Cygni. [Текст] / U. Munari, R. Margoni, A. Mammano // Astron. and Astrophys. — 1988. — Т. 202. — С. 83—92.

100. *Stute, M.* Detection of X-rays from the Symbiotic Star V1329 Cyg [Текст] / M. Stute, G. J. M. Luna, J. L. Sokoloski // *Astrophys. J.* — 2011. — Т. 731, № 1. — С. 12. — arXiv: [1102.1976 \[astro-ph.HE\]](#).
101. *Dokuchaeva, O. D.* A New Emission Object [Текст] / O. D. Dokuchaeva // *Information Bulletin on Variable Stars.* — 1976. — Т. 1189. — С. 1.
102. A Multiwavelength Study of the Symbiotic Mira HM Sge with SOFIA and HST [Текст] / S. R. Goldman [и др.] // *Astrophys. J.* — 2024. — Т. 961, № 1. — С. 14. — arXiv: [2312.01984 \[astro-ph.SR\]](#).
103. MERLIN observations of bipolar outflow from HM Sagittae [Текст] / S. P. S. Eyres [и др.] // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 1995. — Т. 274, № 1. — С. 317–323.
104. *Toala, J. A.* An XMM-Newton View of the Symbiotic Stars HM Sge, NQ Gem, and PU Vul [Текст] / J. A. Toala, M. K. Botello, L. Sabin // *Astrophys. J.* — 2023. — Т. 948, № 1. — С. 14. — arXiv: [2301.08191 \[astro-ph.SR\]](#).
105. *Tifft, W. G.* MWC 603, a High-Velocity Symbiotic Star. [Текст] / W. G. Tifft, J. L. Greenstein // *Astrophys. J.* — 1958. — Т. 127. — С. 160.
106. *Dobrzycka, D.* Spectroscopic Observations of V443 Herculis: A Symbiotic Binary With Low Mass White Dwarfs [Текст] / D. Dobrzycka, S. J. Kenyon, J. Mikolajewska // *Astron. J.* — 1993. — Т. 106. — С. 284.
107. V407 Cygni [Текст] / U. Munari [и др.] //. — 1994. — Т. 6049. — С. 2.
108. Lithium in the symbiotic Mira V407 Cyg [Текст] / A. A. Tatarnikova [и др.] // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 2003. — Т. 344, № 4. — С. 1233–1236. — arXiv: [astro-ph/0306295 \[astro-ph\]](#).
109. UBVJHKLM photometry of the symbiotic Mira V407 Cyg in 1998 2002 [Текст] / E. A. Kolotilov [и др.] // *Astronomy Reports.* — 2003. — Т. 47, № 9. — С. 777–788.
110. *Maehara, H.* V407 Cygni. [Текст] / H. Maehara, K. Hirosawa, F. Kabashima // *Central Bureau Electronic Telegrams.* — 2010. — Т. 2199. — С. 1.
111. The 2010 nova outburst of the symbiotic Mira V407 Cyg [Текст] / U. Munari [и др.] // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 2011. — Т. 410, № 1. — С. L52–L56. — arXiv: [1011.0905 \[astro-ph.SR\]](#).

112. Gamma-Ray Emission Concurrent with the Nova in the Symbiotic Binary V407 Cygni [Текст] / A. A. Abdo [и др.] // Science. — 2010. — Т. 329, № 5993. — С. 817–821. — arXiv: [1008.3912 \[astro-ph.HE\]](#).
113. Recurrent symbiotic Nova V407 Cygni: before and after outburst in 2010 [Текст] / V. F. Esipov [и др.] // Baltic Astronomy. — 2015. — Т. 24. — С. 353–359.
114. *Kenyon, S. J.* The symbiotic stars [Текст] / S. J. Kenyon. — Cambridge University Press, 1986.
115. *Munari, U.* Are Symbiotic Stars the Precursors of Type IA Supernovae? [Текст] / U. Munari, A. Renzini // Astrophys. J. — 1992. — Т. 397. — С. L87.
116. *Magrini, L.* A Search for Symbiotic Stars in the Local Group [Текст] / L. Magrini, R. L. M. Corradi, U. Munari // Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution. Т. 303 / под ред. R. L. M. Corradi, J. Mikolajewska, T. J. Mahoney. — 2003. — С. 539. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series). — arXiv: [astro-ph/0208085 \[astro-ph\]](#).
117. A Census of Symbiotic Stars in the 2MASS, WISE, and Gaia Surveys [Текст] / S. Akras [и др.] // Astrophys. J. Suppl. — 2019. — Т. 240, № 2. — С. 21. — arXiv: [1902.01451 \[astro-ph.SR\]](#).
118. SU Lyn - a transient symbiotic star [Текст] / K. Ilkiewicz [и др.] // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2022. — Т. 510, № 2. — С. 2707–2717. — arXiv: [2112.03314 \[astro-ph.SR\]](#).
119. Study of Nine Symbiotic Star Candidates. Discovery of the Symbiotic Nature of V520 And [Текст] / N. A. Maslennikova [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2025. — Т. 80, № 1. — С. 58–68.
120. Gaia Data Release 3. All-sky classification of 12.4 million variable sources into 25 classes [Текст] / L. Rimoldini [и др.] // Astron. and Astrophys. — 2023. — Т. 674. — A14. — arXiv: [2211.17238 \[astro-ph.GA\]](#).
121. Analysis of Previously Classified White Dwarf-Main-sequence Binaries Using Data from the APOGEE Survey [Текст] / K. A. Corcoran [и др.] // Astron. J. — 2021. — Т. 161, № 3. — С. 143. — arXiv: [2012.12997 \[astro-ph.SR\]](#).

122. *Boyarchuk, A. A.* Symbiotic stars. Introductory report [Текст] / A. A. Boyarchuk // Communications of the Konkoly Observatory Hungary. — 1969. — Т. 65. — С. 395—410.
123. The GALAH survey and symbiotic stars - I. Discovery and follow-up of 33 candidate accreting-only systems [Текст] / U. Munari [и др.] // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2021. — Т. 505, № 4. — С. 6121—6154. — arXiv: [2104.02686](https://arxiv.org/abs/2104.02686) [[astro-ph.SR](#)].
124. *Bond, H. E.* A spectroscopic survey of high-latitude blue variables. II. [Текст] / H. E. Bond // Publ. Astron. Soc. Pacific. — 1978. — Т. 90. — С. 526—530.
125. *Goranskij, V. P.* Photographic and photoelectric photometry of the variable star V627 Cassiopeiae (AS 501). [Текст] / V. P. Goranskij, E. A. Kolotilov // Peremennye Zvezdy. — 1988. — Т. 22. — С. 667—671.
126. *Ikeda, Y.* Spectroscopic Diagnostics of Symbiotic Stars. II. Statistical Analyses of Highly Resolved Emission-Line Profiles [Текст] / Y. Ikeda, S. Tamura // Publ. Astron. Soc. Japan. — 2004. — Т. 56. — С. 353—379.
127. SU Lyncis, a hard X-ray bright M giant: clues point to a large hidden population of symbiotic stars [Текст] / K. Mukai [и др.] // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2016. — Т. 461, № 1. — С. L1—L5. — arXiv: [1604.08483](https://arxiv.org/abs/1604.08483) [[astro-ph.SR](#)].
128. *Payne-Gaposchkin, C.* The galactic novae [Текст] / C. Payne-Gaposchkin. — 1964.
129. *Kenyon, S. J.* The Cool Components of Symbiotic Stars. I. Optical Spectral Types [Текст] / S. J. Kenyon, T. Fernandez-Castro // Astron. J. — 1987. — Т. 93. — С. 938.
130. *Schaefer, B. E.* The B & V light curves for recurrent nova T CrB from 1842-2022, the unique pre- and post-eruption high-states, the complex period changes, and the upcoming eruption in 2025.5 ± 1.3 [Текст] / B. E. Schaefer // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2023. — Т. 524, № 2. — С. 3146—3165. — arXiv: [2303.04933](https://arxiv.org/abs/2303.04933) [[astro-ph.SR](#)].
131. Active phases and flickering of a symbiotic recurrent nova T CrB [Текст] / K. Ilkiewicz [и др.] // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2016. — Т. 462, № 3. — С. 2695—2705. — arXiv: [1607.06804](https://arxiv.org/abs/1607.06804) [[astro-ph.SR](#)].

132. *Munari, U.* The "Super-Active" Accretion Phase of T CrB has Ended [Текст] / U. Munari // Research Notes of the American Astronomical Society. — 2023. — Т. 7, № 7. — С. 145. — arXiv: [2307.00255 \[astro-ph.SR\]](#).
133. Recurrent Symbiotic Nova T Coronae Borealis before Outburst [Текст] / N. A. Maslennikova [и др.] // Astronomy Letters. — 2023. — Т. 49, № 9. — С. 501—515. — arXiv: [2308.10011 \[astro-ph.SR\]](#).
134. The Triple Symbiotic System CH Cygni [Текст] / K. H. Hinkle [и др.] // Astron. J. — 1993. — Т. 105. — С. 1074.
135. *Hinkle, K. H.* Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. VII. Binary Orbit and Long Secondary Period Variability of CH Cygni [Текст] / K. H. Hinkle, F. C. Fekel, R. R. Joyce // Astrophys. J. — 2009. — Т. 692, № 2. — С. 1360—1373. — arXiv: [0811.0631 \[astro-ph\]](#).
136. *Taylor, A. R.* A radio outburst and jet from the symbiotic star CH Cyg [Текст] / A. R. Taylor, E. R. Seaquist, J. A. Mattei // Nature. — 1986. — Т. 319, № 6048. — С. 38—41.
137. Cessation of optical flickering from the symbiotic star CH Cygni [Текст] / J. L. Sokoloski [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2010. — Т. 2707. — С. 1.
138. Optical flickering of the symbiotic star CH Cyg [Текст] / K. A. Stoyanov [и др.] // Bulgarian Astronomical Journal. — 2018. — Т. 28. — С. 42. — arXiv: [1711.01749 \[astro-ph.SR\]](#).
139. UV spectroscopy confirms SU Lyn to be a symbiotic star [Текст] / V. Kumar [и др.] // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 2021. — Т. 500, № 1. — С. L12—L16. — arXiv: [2009.03104 \[astro-ph.SR\]](#).
140. The hidden symbiotic star SU Lyn - detection of flickering in U band [Текст] / R. K. Zamanov [и др.] // Bulgarian Astronomical Journal. — 2023. — Т. 38. — С. 83. — arXiv: [2206.10151 \[astro-ph.SR\]](#).
141. General catalogue of variable stars: Version GCVS 5.1 [Текст] / N. N. Samus' [и др.] // Astronomy Reports. — 2017. — Т. 61, № 1. — С. 80—88.
142. Time-resolved high-resolution spectroscopy of CH Cygni: evidence for a magnetic propeller state in 1994 [Текст] / Т. Tomov [и др.] // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 1996. — Т. 278, № 2. — С. 542—550.

143. *Sokoloski, J. L.* Rapid Variability as a Diagnostic of Accretion and Nuclear Burning in Symbiotic Stars and Supersoft X-Ray Sources (invited review talks) [Текст] / J. L. Sokoloski // Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution. Т. 303 / под ред. R. L. M. Corradi, J. Mikolajewska, T. J. Mahoney. — 2003. — С. 202. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series). — arXiv: [astro-ph/0209101](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0209101) [[astro-ph](#)].
144. Searching for rapid spectral changes related to the flickering activity in MWC 560. [Текст] / Т. Томов [и др.] // Astron. and Astrophys. — 1995. — Т. 300. — С. 769.
145. Rapid H α Variability in T Coronae Borealis [Текст] / R. Zamanov [и др.] // Publ. Astron. Soc. Pacific. — 2005. — Т. 117, № 829. — С. 268—273. — arXiv: [astro-ph/0412616](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0412616) [[astro-ph](#)].
146. On Uncertainties in Cross-Correlation Lags and the Reality of Wavelength-dependent Continuum Lags in Active Galactic Nuclei [Текст] / B. M. Peterson [и др.] // Publ. Astron. Soc. Pacific. — 1998. — Т. 110, № 748. — С. 660—670. — arXiv: [astro-ph/9802103](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9802103) [[astro-ph](#)].
147. *Oknyanskii, V. L.* Delayed infrared emission of the nucleus of NGC 4151 [Текст] / V. L. Oknyanskii // Astronomy Letters. — 1993. — Т. 19, № 6. — С. 416—419.
148. Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. I. Orbits for Well-Known S-Type Systems [Текст] / F. C. Fekel [и др.] // Astron. J. — 2000. — Т. 119, № 3. — С. 1375—1388.
149. Binarity in Cool Asymptotic Giant Branch Stars: A GALEX Search for Ultraviolet Excesses [Текст] / R. Sahai [и др.] // Astrophys. J. — 2008. — Т. 689, № 2. — С. 1274—1278. — arXiv: [0807.1944](https://arxiv.org/abs/0807.1944) [[astro-ph](#)].
150. Strong Variable Ultraviolet Emission from Y Gem: Accretion Activity in an Asymptotic Giant Branch Star with a Binary Companion? [Текст] / R. Sahai [и др.] // Astrophys. J. — 2011. — Т. 740, № 2. — С. L39. — arXiv: [1108.3597](https://arxiv.org/abs/1108.3597) [[astro-ph.SR](#)].
151. A Pilot Deep Survey for X-Ray Emission from fuvAGB Stars [Текст] / R. Sahai [и др.] // Astrophys. J. — 2015. — Т. 810, № 1. — С. 77. — arXiv: [1507.07509](https://arxiv.org/abs/1507.07509) [[astro-ph.SR](#)].

152. Binarity and Accretion in AGB Stars: HST/STIS Observations of UV Flickering in Y Gem [Текст] / R. Sahai [и др.] // *Astrophys. J.* — 2018. — Т. 860, № 2. — С. 105. — arXiv: [1805.03301 \[astro-ph.SR\]](#).
153. Y Gem: A White Dwarf Symbiotic Star? [Текст] / Z.-l. Yu [и др.] // *Astrophys. J.* — 2022. — Т. 932, № 2. — С. 132.
154. Y Gem, a symbiotic star outshone by its asymptotic giant branch primary component [Текст] / M. A. Guerrero [и др.] // *Astron. and Astrophys.* — 2025. — Т. 693. — A203. — arXiv: [2411.14270 \[astro-ph.SR\]](#).
155. *Sokoloski, J. L.* Evidence for the White Dwarf Nature of Mira B [Текст] / J. L. Sokoloski, L. Bildsten // *Astrophys. J.* — 2010. — Т. 723, № 2. — С. 1188—1194. — arXiv: [1009.2509 \[astro-ph.SR\]](#).
156. Colours of the flickering source of Mira [Текст] / R. Zamanov [и др.] // *Bulgarian Astronomical Journal.* — 2019. — Т. 31. — С. 110. — arXiv: [1903.03782 \[astro-ph.SR\]](#).
157. The Bright Symbiotic Mira EF Aquilae [Текст] / B. Margon [и др.] // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 2016. — Т. 128, № 960. — С. 024201. — arXiv: [1512.04075 \[astro-ph.SR\]](#).
158. RAMSES II: RAMan Search for Extragalactic Symbiotic Stars Project Concept, Commissioning, and Early Results from the Science Verification Phase [Текст] / R. Angeloni [и др.] // *Astron. J.* — 2019. — Т. 157, № 4. — С. 156. — arXiv: [1903.03225 \[astro-ph.SR\]](#).
159. *Lucy, A. B.* The Detection and Description of Symbiotic Accretion From Cool Evolved Stars [Текст] : дис. ... канд. / Lucy Adrian B. — Columbia University, New York, 2021.
160. *MacConnell, D. J.* Results of a New Survey for Early-Type Emission Stars [Текст] / D. J. MacConnell // *Be Stars.* Т. 98 / под ред. M. Jaschek, H.-G. Groth. — 1982. — С. 131. — (IAU Symposium).
161. *Stephenson, C. B.* A general catalogue of S stars [Текст] / C. B. Stephenson // *Publications of the Warner & Swasey Observatory.* — 1984.
162. A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS [Текст] / G. M. Green [и др.] // *Astrophys. J.* — 2019. — Т. 887, № 1. — С. 93. — arXiv: [1905.02734 \[astro-ph.GA\]](#).

163. Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties [Текст] / Gaia Collaboration [и др.] // *Astron. and Astrophys.* — 2021. — Т. 649. — А1. — arXiv: [2012.01533](https://arxiv.org/abs/2012.01533) [[astro-ph.GA](#)].
164. *Ochsenbein, F.* The VizieR database of astronomical catalogues [Текст] / F. Ochsenbein, P. Bauer, J. Marcout // *Astron. and Astrophys. Suppl.* — 2000. — Т. 143. — С. 23—32. — arXiv: [astro-ph/0002122](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0002122) [[astro-ph](#)].
165. *Murset, U.* Temperatures and luminosities of symbiotic novae. [Текст] / U. Murset, H. Nussbaumer // *Astron. and Astrophys.* — 1994. — Т. 282. — С. 586—604.
166. *Tylenda, R.* The continuous radiation emitted by accretion discs in cataclysmic binaries: the dwarf nova SS Cyg during outburst and the old novae V603 Aql and RR Pic. [Текст] / R. Tylenda // *Acta Astronomica.* — 1977. — Т. 27. — С. 235—249.
167. The ASAS-SN catalogue of variable stars I: The Serendipitous Survey [Текст] / Т. Jayasinghe [и др.] // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 2018. — Т. 477, № 3. — С. 3145—3163. — arXiv: [1803.01001](https://arxiv.org/abs/1803.01001) [[astro-ph.SR](#)].
168. The ASAS-SN catalogue of variable stars - II. Uniform classification of 412 000 known variables [Текст] / Т. Jayasinghe [и др.] // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 2019. — Т. 486, № 2. — С. 1907—1943. — arXiv: [1809.07329](https://arxiv.org/abs/1809.07329) [[astro-ph.SR](#)].
169. H α variability of the recurrent nova T Coronae Borealis [Текст] / V. Stanishev [и др.] // *Astron. and Astrophys.* — 2004. — Т. 415. — С. 609—616. — arXiv: [astro-ph/0311309](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0311309) [[astro-ph](#)].
170. Recurrent Symbiotic Nova T Coronae Borealis before Outburst [Текст] / N. A. Maslennikova [и др.] // *Astronomy Letters.* — 2023. — Т. 49, № 9. — С. 501—515. — arXiv: [2308.10011](https://arxiv.org/abs/2308.10011) [[astro-ph.SR](#)].
171. Size of the accretion disc in the recurrent nova T CrB [Текст] / R. K. Zamanov [и др.] // *Astronomische Nachrichten.* — 2024. — Т. 345. — e20240036. — arXiv: [2405.11506](https://arxiv.org/abs/2405.11506) [[astro-ph.SR](#)].
172. *Mikolajewska, J.* On the Nature of the Symbiotic Star BF Cygni [Текст] / J. Mikolajewska, S. J. Kenyon, M. Mikolajewski // *Astron. J.* — 1989. — Т. 98. — С. 1427.

173. *Mikolajewska, J.* Symbiotic Stars: Observations Confront Theory [Текст] / J. Mikolajewska // *Baltic Astronomy*. — 2012. — Т. 21. — С. 5–12. — arXiv: [1110.2361](#) [[astro-ph.SR](#)].
174. *Tatarnikova, A. A.* Modeling of the IR Light Curves of the Symbiotic Recurrent Nova T CrB [Текст] / A. A. Tatarnikova, A. M. Tatarnikov, V. I. Shenavrin // *Binary Paths to Type Ia Supernovae Explosions*. Т. 281 / под ред. R. Di Stefano, M. Orio, M. Moe. — 2013. — С. 203–204. — (IAU Symposium).
175. *Gray, R. O.* *Stellar Spectral Classification* [Текст] / R. O. Gray, C. Corbally J. — 2009.
176. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA) [Текст] / B. Paxton [и др.] // *Astrophys. J. Suppl.* — 2011. — Т. 192, № 1. — С. 3. — arXiv: [1009.1622](#) [[astro-ph.SR](#)].
177. A First Catalog of Variable Stars Measured by the Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System (ATLAS) [Текст] / A. N. Heinze [и др.] // *Astron. J.* — 2018. — Т. 156, № 5. — С. 241. — arXiv: [1804.02132](#) [[astro-ph.SR](#)].
178. Gaia Data Release 3. The second Gaia catalogue of long-period variable candidates [Текст] / T. Lebzelter [и др.] // *Astron. and Astrophys.* — 2023. — Т. 674. — A15. — arXiv: [2206.05745](#) [[astro-ph.SR](#)].
179. Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties [Текст] / Gaia Collaboration [и др.] // *Astron. and Astrophys.* — 2023. — Т. 674. — A1. — arXiv: [2208.00211](#) [[astro-ph.GA](#)].
180. *Schmid, H. M.* Identification of the emission bands at lambda lambda 6830, 7088. [Текст] / H. M. Schmid // *Astron. and Astrophys.* — 1989. — Т. 211. — С. L31–L34.
181. *Lockwood, G. W.* Light Curves of Mira Variables at 1.04 Microns [Текст] / G. W. Lockwood, R. F. Wing // *Astrophys. J.* — 1971. — Т. 169. — С. 63.
182. Infrared Observations of the Star R Cas [Текст] / A. E. Nadzhip [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2001. — Т. 27. — С. 324–327.
183. A Model of the Dust Envelope of the Carbon Mira Star V CrB from Photometry, Infrared Spectroscopy, and Speckle Polarimetry [Текст] / A. A. Fedoteva [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2020. — Т. 46, № 1. — С. 38–57.

184. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) [Текст] / М. F. Skrutskie [и др.] // *Astron. J.* — 2006. — Т. 131, № 2. — С. 1163—1183.
185. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance [Текст] / E. L. Wright [и др.] // *Astron. J.* — 2010. — Т. 140, № 6. — С. 1868—1881. — arXiv: [1008.0031 \[astro-ph.IM\]](#).
186. The AKARI/IRC mid-infrared all-sky survey [Текст] / D. Ishihara [и др.] // *Astron. and Astrophys.* — 2010. — Т. 514. — A1. — arXiv: [1003.0270 \[astro-ph.IM\]](#).
187. The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission. [Текст] / G. Neugebauer [и др.] // *Astrophys. J.* — 1984. — Т. 278. — С. L1—L6.
188. *Fitzpatrick, E. L.* Correcting for the Effects of Interstellar Extinction [Текст] / E. L. Fitzpatrick // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 1999. — Т. 111, № 755. — С. 63—75. — arXiv: [astro-ph/9809387 \[astro-ph\]](#).
189. *Miller, W. C.* Spectroscopic Observations of the Stars. [Текст] / W. C. Miller, P. W. Merrill // *Astrophys. J.* — 1951. — Т. 113. — С. 624.
190. *Henize, K. G.* Observations of southern emission-line stars. [Текст] / K. G. Henize // *Astrophys. J. Suppl.* — 1976. — Т. 30. — С. 491—550.
191. *Kohoutek, L.* Catalogue of H-alpha emission stars in the Northern Milky Way [Текст] / L. Kohoutek, R. Wehmeyer // *Astron. and Astrophys. Suppl.* — 1999. — Т. 134. — С. 255—256.
192. *Reed, B. C.* Catalog of Galactic OB Stars [Текст] / B. C. Reed // *Astron. J.* — 2003. — Т. 125, № 5. — С. 2531—2533.
193. Estimating Distances from Parallaxes. V. Geometric and Photogeometric Distances to 1.47 Billion Stars in Gaia Early Data Release 3 [Текст] / C. A. L. Bailer-Jones [и др.] // *Astron. J.* — 2021. — Т. 161, № 3. — С. 147. — arXiv: [2012.05220 \[astro-ph.SR\]](#).
194. *Koornneef, J.* Near-infrared photometry. II. Intrinsic colours and the absolute calibration from one to five micron. [Текст] / J. Koornneef // *Astron. and Astrophys.* — 1983. — Т. 128, № 1. — С. 84—93.

195. Towards the absolute planes: a new calibration of the bolometric corrections and temperature scales for Population II giants [Текст] / P. Montegriffo [и др.] // Monthly Notices Royal Astron. Soc. — 1998. — Т. 297, № 3. — С. 872—884. — arXiv: [astro-ph/9804297](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9804297) [[astro-ph](#)].
196. *Mikolajewska, J.* A spectrophotometric study of CI Cygni during the 1980 eclipse. [Текст] / J. Mikolajewska, M. Mikolajewski // Acta Astronomica. — 1983. — Т. 33. — С. 403—429.
197. The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results [Текст] / E. C. Bellm [и др.] // Publ. Astron. Soc. Pacific. — 2019. — Т. 131, № 995. — С. 018002. — arXiv: [1902.01932](https://arxiv.org/abs/1902.01932) [[astro-ph.IM](#)].
198. A catalogue of symbiotic stars [Текст] / K. Belczynski [и др.] // Astron. and Astrophys. Suppl. — 2000. — Т. 146. — С. 407—435. — arXiv: [astro-ph/0005547](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0005547) [[astro-ph](#)].

Список рисунков

1.1	Общая схема системы управления Цейсс-2.	21
1.2	Окно программы управления телескопом.	23
1.3	Окно программы управления камерой.	25
1.4	Проекция изображения CSS 1102 на ось X (а) и увеличенный участок этой проекции (б). Синяя линия обозначает опорное изображение, зеленая — изображение, для которого считаются поправки. На верхних графиках показаны проекции полученные по сырым кадрам, на нижнем — по кадрам, к которым применен медианный фильтр.	29
1.5	Коррекции по прямому восхождению (левый рисунок) и склонению (правый рисунок) в течение мониторингов. По оси абсцисс отложено время в днях. Точки разного цвета обозначают наблюдения разных объектов; для наглядности графики сдвинуты на произвольную константу.	31
1.6	Кривые пропускания фильтров U (синяя линия) и B (красная линия), атмосферы (черная линия), входного окна камеры (фиолетовая линия) и кривая чувствительности ПЗС-камеры Andor iKON-L (зеленая линия) . Штриховыми линиями показаны кривые реакции соответствующих инструментальных полос (произведение пропускания фильтров, входного окна и чувствительности камеры) .	33
1.7	Зависимость величины красной утечки в полосах U и B от цвета для звезд разных классов светимости	34
1.8	Спектр SU Lup, полученный 9 декабря 2022 г., исправленный за межзвездное покраснение с $E(B - V) = 0.64$ (синяя линия) и спектр красного гиганта спектрального класса M5 III из работы [28]	34
1.9	Кривые блеска SU Lup в полосе U (наблюдаемая кривая — синие точки, исправленная за красную утечку — зеленые точки) и звезд сравнения (фиолетовые, коричневые, красные и желтые точки) Кривые блеска звезд сравнения произвольно сдвинуты по оси ординат	35

- 1.10 Кривые блеска СН Суг в полосе B (наблюдаемая — синие точки, исправленная за красную утечку — зеленые точки) и контрольной звезды (красные точки), полученные 06.11.2019 (а) и 15.12.2022 (б). Кривые блеска контрольных звезд произвольно сдвинуты по оси ординат 36
- 2.1 Фотометрический мониторинг АХ Per в полосе B , полученный 18.08.2024 на Цейсс-600 КАС, в котором быстрая переменность блеска отсутствует: а) кривая блеска (точки), звездочками и треугольниками обозначены измерения блеска для звезд сравнения; б) периодограмма Ломба-Скаргла. Пунктирной линией отмечены вероятность ложной тревоги (FAP) 0.0006% и 5% 46
- 2.2 Фотометрический мониторинг Z And в полосе U , полученный 16.12.2021 на NBI 2.5-м. телескопа КГО. У Z And переменность связана с вращением белого карлика с сильным магнитным полем: а) кривая блеска; б) график вейвлет-коэффициентов; в) периодограмма Ломба-Скаргла. Пунктирной линией отмечены вероятность ложной тревоги (FAP) 0.0006% и 5% 46
- 2.3 Фотометрический мониторинг CSS 1102 в полосе B , полученный 10.07.2021 на RC600 КГО, в котором у CSS1102 был обнаружен фликкер-эффект: а) кривая блеска (точки), звездочками и треугольниками обозначены измерения блеска для звезд сравнения; б) график вейвлет-коэффициентов; в) периодограмма Ломба-Скаргла. Пунктирной линией отмечены вероятность ложной тревоги (FAP) 0.0006% и 5% 47
- 2.4 Кривые блеска Z And, полученные 09.02.2020 (а), 14.08.2021 (б), 16.12.2021 (в) и 25.10.2024 (г). 48
- 2.5 периодограмма Ломба-Скаргла, построенная по кривой блеска, полученной 16.12.2021. Пунктирной линией отмечены вероятность ложной тревоги 0.0006% и 5%. 49
- 2.6 Кривая блеска V1413 Aql в полосе V (1991 - 2025 гг.). Красными вертикальными линиями отмечены моменты получения нами мониторингов для поиска фликкер-эффекта. Зелеными вертикальными линиями отмечены моменты наблюдения спутника TESS, в которых был найден фликкер-эффект [35]. 50

- 2.7 Кривая блеска V1413 Aql, полученная 22 июня 2025 г. в полосе *B*. 52
- 2.8 Кривые блеска YY Her (слева) и BF Cyg (справа) по данным AAVSO в полосе *V*. Красными вертикальными линиями отмечены моменты получения мониторингов. 53
- 2.9 Кривая блеска AG Peg в полосе *V* по данным AAVSO. Красными вертикальными линиями отмечены моменты получения мониторингов 57
- 2.10 Линия H α на спектрах низкого разрешения BD-14 450. Уровень непрерывного спектра соответствует нулевому значению потока. Спектры перед вычитанием были нормированы на значение непрерывного спектра. Синяя линия — спектр, полученный 27.01.2023, зеленая — 05.02.2023, красная — 12.10.2023, голубая — 08.11.2023, фиолетовая — 04.12.2023, желтая — 07.02.2024, черная — 21.12.2024. 64
- 2.11 Кривая блеска T CrB в полосе *B* по данным AAVSO. Зелеными вертикальными линиями отмечены моменты получения мониторингов 67
- 2.12 Кривые блеска T CrB 69
- 2.13 Кривые блеска SN Cyg 71
- 2.14 Кривая блеска SN Cyg в полосах *V* (красные точки, кривая блеска сдвинута на константу) по данным AAVSO, *J* (синие точки) и *M* (зеленые точки) по данным В.И. Шенаврина (устное сообщение). Зелеными вертикальными линиями отмечены моменты получения мониторингов, когда фликкер-эффект был зарегистрирован, красными — когда не был зарегистрирован. Первая красная линия — момент наблюдения системы космическим телескопом Кеплер. 72
- 2.15 Кривые блеска в полосе *B* DQ Ser по данным мониторингов, полученных 21.10.2021 (слева) и 27.10.2021 (справа) 74
- 3.1 Спектры HR4963, полученные при разной облачности (а). Относительные изменения спектров, полученных при минимальном и максимальном поглощении (b). 80

- 3.2 Спектры BD+75d325, полученные при разном положении объекта в щели (верхняя линия — звезда в центре щели, средняя линия — звезда смещена на $0.5''$, нижняя линия — центр звезды находился вне щели на расстоянии $1''$ от ее центра)(а). Разность между верхним и средним спектрами (б). Качество изображения составляло $1.8''$, ширина щели $1''$ 81
- 3.3 Исправленные за межзвездное покраснение наблюдаемые спектры T CrB, полученные 25 августа 2020 г.(синяя линия), 8 июня 2023 г. (зеленая линия) и 26 апреля 2024 г. (красная линия). 83
- 3.4 Кривые изменения потоков T CrB (сверху вниз) в полосе B и в линиях H β , H α , He I $\lambda 5875.6$, He II $\lambda 4685.7$ и [Ne III] в течение спектрального мониторинга 25 августа 2020 г. 84
- 3.5 Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений T CrB 25 августа 2020 г. 85
- 3.6 Кривые изменения потоков (сверху вниз) в линиях H α , H β и в диапазоне длин волн λ 3600 - 3650 Å в течение спектрофотометрического мониторинга 06 сентября 2020 г. 86
- 3.7 Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений T CrB 6 сентября 2020 г. 87
- 3.8 Кривая блеска в полосе B (верхний график) и кривые изменения эквивалентной ширины линий (сверху вниз) H β , H α , He II $\lambda 4686$ и [Ne III] $\lambda 3869$ в течение спектрального мониторинга 08 июня 2023 г. 88
- 3.9 Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений T CrB 8 июня 2023 г. 89
- 3.10 Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений T CrB 26 апреля 2024 г. 89
- 3.11 Спектр Y Gem, полученный 17 января 2024 г. 91
- 3.12 Коэффициенты корреляции Пирсона в зависимости от временной задержки для наблюдений Y Gem 17 января 2024 г. 92
- 3.13 Спектры LAMOST J122804.90-014825.7 (синяя линия, получен 4 января 2022 г.), и Миры (зеленая линия, получен 24 января 2024 г.) 93

- 4.1 Кривая блеска CSS 1102 в фильтре B (точки) по данным, полученным во время мониторинга 1 сентября 2020 (слева) и 10 июля 2021 (справа). Звездочками и треугольниками обозначены измерения блеска для звезд сравнения. 98
- 4.2 Исправленный за межзвездное покраснение наблюдаемый (серая линия) и смоделированный (черная линия) спектры CSS 1102 и модельные спектры отдельных компонентов системы: пунктирная линия — красный гигант, штриховая линия — диск, штрих-пунктирная линия — туманность 99
- 4.3 Спектр абсолютно черного тела (штриховая линия) с $T_{eff} = 3400 K$, исправленный за межзвездное покраснение наблюдаемый спектр CSS 1102 (сплошная линия), поток в ближнем и среднем ИК диапазоне (точки) по данным из VizieR ([164]). 100
- 4.4 Профили линии $H\alpha$, полученные 31.08.2020 (слева) и 28.10.2020 (справа). Уровень непрерывного спектра соответствует нулевому значению потока 101
- 4.5 Исправленные за межзвездное покраснение спектры V520 And, полученные (сверху вниз в хронологическом порядке) 25.01.2023, 15.09.2023, 13.10.2023, 04.12.2023, 15.12.2023 и 12.06.2024. 106
- 4.6 Фрагменты спектров V520 And, полученные (сверху вниз) 25.01.2023, 15.09.2023, 13.10.2023, 04.12.2023 и 12.06.2024. Отрезками для наглядности соединены абсорбционные особенности в спектре холодного компонента на 5000\AA и 5050\AA 107
- 4.7 Линия $H\alpha$ на спектрах высокого (верхний рисунок) и низкого (нижний рисунок) разрешения. Уровень непрерывного спектра соответствует нулевому значению потока. На спектрах высокого разрешения тонкие линии — наблюдаемые данные, толстые линии — аппроксимация компонентами, нарисованными штриховыми линиями, синие линии — спектр, полученный 16.12.2023, красные линии — спектр, полученный 06.01.2024. На нижнем рисунке линия $H\alpha$ на спектрах, полученных 25.01.2023 (синий), 15.09.2023 (зеленый), 13.10.2023 (красный), 04.12.2023 (голубой), 15.12.2023 (фиолетовый), 12.06.2024 (желтый). 108

- 4.8 Кривые блеска V520 And (сверху) и звезды сравнения (снизу) в полосе B , полученные 14 октября 2023 г. во время фотометрического мониторинга. 109
- 4.9 Кривые изменения эквивалентных ширин линий $H\alpha$, $H\beta$, $He\ I\ \lambda 5875$, $[Ne\ III]\ \lambda 3869$, полученные во время мониторинга V520 And 04.12.2023 г. 110
- 4.10 Верхняя панель: спектры V520 And от 15.09.2023 (синяя линия) и 12.06.2024 (красная линия), совмещенные в диапазоне $\lambda > 6000\ \text{\AA}$; нижняя панель: разность этих спектров (синяя линия) и спектры суммы излучения в континууме туманности с $T_e = 10000\text{K}$ и горячего компонента с $T_{eff} = 50000\text{K}$ без аккреционного диска (розовая линия) и с диском со светимостью $2L_\odot$ (черная линия). . . 112
- 4.11 Кривая блеска V520 And в полосе V , свернутая с периодом 73.69^d (по данным ASAS-SN) 114
- 4.12 Исправленный за межзвездное покраснение спектр (сплошная линия) и потоки в ближнем и среднем ИК - диапазонах для V520 And по данным из каталогов VizieR (точки). Штриховой линией показано распределение энергии в спектре абсолютно черного тела с $T_{eff} = 3200\text{K}$ 115
- 4.13 Эволюционные треки звезд с солнечной металличностью и начальными массами (снизу-вверх) $1 M_\odot$, $1.2 M_\odot$, $1.5 M_\odot$, $2 M_\odot$, $2.5 M_\odot$, $3 M_\odot$ и $4 M_\odot$. Штриховыми линиями ограничены значения эффективной температуры 3200-3350 К и светимости 1400-2200 L_\odot для красного гиганта V520 And. Масса звезды на стадии, обозначенной кружком, равна $0.6 M_\odot$, треугольником — $0.7 M_\odot$, ромбом — $0.9 M_\odot$, квадратом — $1 M_\odot$, звездочкой — $1.3 M_\odot$ 116
- 4.14 Спектр 2MASS J21012803+4555377 полученный 11 января 2025 г. . . 117
- 4.15 Кривые блеска 2MASS J21012803+4555377 в Bp (зеленые точки), G (синие точки) и Rp (красные точки) полосах, полученные Gaia в 2015 – 2017. 119

- 4.16 Распределение энергии в спектре 2MASS J21012803+4555377, исправленное за межзвездное поглощение с $E(B - V) = 0.7$ – синяя кривая, излучение абсолютно черного тела с $T_{eff} = 3200$ К и тем же болометрическим потоком – красная кривая. Точки на синей кривой это данные нашей фотометрии в полосах V, Rc, Ic , данные 2MASS [184] в J, H, Ks , WISE [185], AKARI [186] и IRAS [187] 120
- 4.17 Исправленный за поглощение в межзвездной среде и околозвездной оболочке с суммарным $E(B - V) = 2$ спектр 2MASS J21012803+4555377 (черная линия) и суммарный спектр излучения красного гиганта M5 III и туманности с $T_e = 15000$ К в континууме (красная линия). 121
- 4.18 Кривые блеска AS 357 в полосах (сверху вниз) Ic, Rc, V, B фотометрической системы Джонсона-Казинса и U в инструментальной системе, полученные на телескопе Цейсс-600 КАС ГАИШ МГУ в 2025 г. 123
- 4.19 Спектры AS 357, полученные 12.02.2025 (красная линия) и 10.06.2025 (синяя линия). 124
- 4.20 Исправленные за межзвездное покраснение спектр AS 357, полученный 10.06.2025 (синяя линия), и модельный спектр симбиотической системы (фиолетовая линия). Компоненты модельного спектра: зеленая линия — излучение красного гиганта M3 III, голубая линия — излучение «теплого» компонента (звезда O8 III), красная линия — сумма излучения туманности с $T_e = 10000$ К и горячего компонента с $T_h = 55000$ К. 125
- 4.21 Спектр (серая линия) и потоки в ближнем и среднем ИК-диапазоне по данным VizieR (серые точки) AS 357, исправленные за межзвездное покраснение, спектр красного гиганта M3 (черная линия) [24] и спектр абсолютно черного тела с $T_{eff} \approx 3560$ К — штриховая линия. 126

- 4.22 Эволюционные треки звезд с солнечной металличностью и начальными массами (снизу-вверх) $1 M_{\odot}$, $1.2 M_{\odot}$, $1.5 M_{\odot}$, $2 M_{\odot}$, $2.5 M_{\odot}$, $3 M_{\odot}$ и $4 M_{\odot}$. Штриховыми линиями ограничены значения эффективной температуры 3500-3600 К и светимости 2500-3400 L_{\odot} . Масса звезды и радиус на стадии, обозначенной треугольником, равны $2.1 M_{\odot}$ и $148 R_{\odot}$, звездочкой — $2.5 M_{\odot}$ и $133 R_{\odot}$, квадратом — $1.9 M_{\odot}$ и $135 R_{\odot}$ 127
- 4.23 Кривая блеска AS 357, полученная на телескопе ZTF в 2018 –2024 гг. в полосе *g*. 128

Список таблиц

1	Характерное время и амплитуда фликкер-эффекта Z And.	48
2	Фотометрические мониторинги V1413 Aql.	51
3	Фотометрические мониторинги AX Per.	53
4	Фотометрические мониторинги YU Her.	53
5	Фотометрические мониторинги BF Cyg.	54
6	Фотометрические мониторинги StHa 169.	55
7	Фотометрические мониторинги LT Del.	56
8	Фотометрические мониторинги CM Aql и StHA 32.	56
9	Фотометрические мониторинги AG Peg.	57
10	Фотометрические мониторинги PU Vul.	59
11	Фотометрические мониторинги V1329 Cyg.	59
12	Фотометрические мониторинги V407 Cyg.	61
13	Фотометрические мониторинги кандидатов в симбиотические звезды.	63
14	Фотометрические мониторинги малоизученных симбиотических звезд.	66
15	Фотометрические мониторинги T CrB.	68
16	Фотометрические мониторинги CH Cyg.	70
17	Фотометрические мониторинги SU Lyn.	73
18	Фотометрические мониторинги DQ Ser.	74
19	Спектральные и спектрофотометрический мониторинги T CrB.	82
20	Амплитуды фликкер-эффекта T CrB, измеренные 25 августа 2020 г.	84
21	Амплитуды фликкер-эффекта, измеренные 06 сентября 2020 г.	86
22	Амплитуды фликкер-эффекта, измеренные 08 июня 2023 г.	88
23	Амплитуды фликкер-эффекта, измеренные 26 апреля 2024 г.	89
24	Амплитуды фликкер-эффекта в линиях в спектрах Y Gem, измеренные 17 января 2024 г.	91
25	Спектральные мониторинги LAMOST J122804.90-014825.7 и Миры.	93
26	Точность определения переменности потоков у различных линий в спектральных мониторингах LAMOST J122804.90-014825.7 и Миры.	94
27	Блеск CSS 1102 в фильтрах B, V, Rc, Ic.	97
28	Потоки в эмиссионных линиях в спектре CSS 1102, полученном 31.08.2020.	101

29	Журнал спектральных наблюдений V520 And.	104
----	--	-----