

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт астрономии Российской академии наук

На правах рукописи

Шеянов Евгений Григорьевич

**Фотометрическое исследование маломассивных двойных звёзд  
с релятивистским компонентом**

1.3.1. Физика космоса, астрономия

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор

Самусь Николай Николаевич

Научный консультант:

к.ф.-м.н. Шугаров Сергей Юрьевич

Москва 2025

## Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. Получение и обработка фотометрических данных</b>	<b>11</b>
1.1. Выбор объектов исследования	11
1.2. Широкополосные фотометрические наблюдения переменных	14
1.3. Обработка изображений и получение временных рядов	16
<b>Глава 2. Исследование рентгеновской новой v3721 Ori</b>	<b>22</b>
2.1. Общие свойства рентгеновских новых	22
2.2. История открытия и наблюдений переменной v3721 Ori	27
2.3. Известные параметры системы	33
2.4. Фотометрические особенности вспышки 2018-2020 годов	37
2.5. Исследование периодических модуляций блеска	43
2.6. Интерпретация полученных данных	48
<b>Глава 3. Исследование катаклизмической переменной TCR J07094936+1412280</b>	<b>51</b>
3.1. Общие свойства карликовых новых	51
3.2. Вспышка переменной TCR J07094936+1412280 в 2021-2022 годах	57
3.3. Оценка физических параметров системы	61
<b>Заключение</b>	<b>64</b>
<b>Список литературы</b>	<b>66</b>

## **Введение**

Переменные звёзды являются важным источником информации о Вселенной. Если колебания блеска одиночных звёзд помогают нам понять их внутреннее строение и эволюцию, то переменность двойных систем способна рассказать гораздо больше – позволяя динамически определять массы компонентов и раскрывая перед нами широкий спектр явлений, порождаемых их взаимодействием (эффекты взаимного прогрева, обмена масс, столкновения звёздного ветра и т.п., вплоть до слияния двух звёздных объектов в один). Кроме того, показано, что тесные двойные системы на поздних стадиях эволюции могут оказывать существенное влияние на химический состав галактик (обогащая межзвёздное вещество тяжёлыми элементами в результате слияния нейтронных звёзд и вспышек сверхновых типа Ia).

Характер и механизмы переменности в двойных системах чрезвычайно разнообразны. Настоящая работа сосредоточена на исследовании тесных двойных с активным обменом масс, в которых одним из компонентов является компактный вырожденный объект – конечный продукт эволюции более массивной звезды, а вторым – маломассивная невырожденная звезда-донор. Рассматриваются два сравнительно редких класса таких систем – рентгеновские и карликовые новые (на примерах переменных источников V3721 Oph и TCR J07094936+1412280). Для обоих классов характерна дисковая аккреция вещества звезды-донора на главный компонент, сопровождающаяся вспышечной активностью.

**Актуальность исследования** подобных систем заключается в возможности получения информации о редких малоизученных объектах и происходящих там физических процессах, полное и однозначное понимание которых на сегодняшний день отсутствует. Отдельно стоит отметить, что

рентгеновские новые благодаря своим свойствам оказываются одним из основных поставщиков данных о чёрных дырах звёздных масс.

**Цель настоящей работы** состоит во всестороннем фотометрическом исследовании выбранных объектов, феноменологическом описании их наблюдаемой активности и определении их физических характеристик.

При выполнении работы решались следующие **задачи**:

- получение изображений источников в различных широких спектральных полосах и последующая их обработка для проведения процедуры апертурной фотометрии;

- получение кривых блеска объектов на всех стадиях вспышки вплоть до возвращения в спокойное состояние и анализ их наблюдаемых особенностей;

- поиск и изучение локальной переменности блеска объектов на разных временных масштабах, в особенности – периодической;

- определение периодов выявленных модуляций блеска статистическими методами, сравнение наблюдаемых и вычисленных положений фотометрических максимумов, исследование эволюции этих модуляций на протяжении вспышки;

- оценка доступных для определения физических параметров исследуемых систем;

- сопоставление полученных результатов с другими доступными данными.

**Объектом данного исследования** являются маломассивные тесные двойные звёздные системы с компактным компонентом: рентгеновская новая V3721 Ori, вспышка которой наблюдалась в широком диапазоне длин волн от

радио- до рентгеновского с 2018 по 2020 год, и катаклизмическая переменная типа WZ Sge TCR J07094936+1412280, демонстрировавшая оптическую вспышку в 2021-2022 годах, а также происходящие в данных объектах физические процессы.

Обе рассматриваемые системы представляют собой тесные двойные на поздних стадиях эволюции, в которых происходит вторичный обмен масс, и состоят из проэволюционировавшего главного компонента, нормальной красной звезды-донора и вещества, нестационарно перетекающего со вторичного компонента на компактный объект; в качестве последнего предполагается белый карлик у TCR J07094936+1412280 и чёрная дыра звёздной массы у V3721 Ori, что представляет повышенный научный интерес.

**Предмет исследования** составляют кривые блеска указанных переменных во время вспышек, их фотометрическая эволюция и возникавшие при вспышках периодические модуляции светимости.

**Научная новизна** обеспечивается использованием оригинальных наблюдений переменных источников; исследуемые объекты не были известны до рассматриваемых в работе вспышек, параметры систем оценивались впервые либо подлежали уточнению.

**Научная значимость** полученных результатов состоит в накоплении информации о вспыхивающих тесных двойных системах. Исследуемые источники принадлежат к сравнительно редким классам объектов (число известных рентгеновских новых измеряется лишь десятками, переменных типа WZ Sge – сотнями); описание каждой подобной системы и нахождение определяемых в работе параметров, таким образом, имеет статистическое значение для наших представлений об этих классах в целом. В свою очередь, уточнение этих представлений является ключом к верному пониманию

свойственных данным классам уникальных физических процессов. Наблюдение поведения вещества в экстремальных условиях, труднодостижимых экспериментально, может иметь в дальнейшем и прикладное значение.

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

- Переменная V3721 Ori во время вспышки 2018-2020 годов демонстрирует, одновременно со сложной эволюцией оптического блеска, заметные изменения показателей цвета. При этом во время высокого мягкого состояния рентгеновского излучения распределение энергии в оптическом диапазоне смещается в сторону коротких волн, а по мере уменьшения оптического потока происходит его “покраснение”, что свидетельствует об остывании аккреционного диска.

- В системе V3721 Ori уверенно выделяются периодические модуляции оптической светимости во время вспышки (во всех доступных фотометрических полосах) на временном интервале MJD 58283-58391, заметные также и в рентгеновском диапазоне (в более узком временном промежутке MJD 58309-58326). Период модуляций найден равным  $0.68885^d$ , показывая незначительные фазовые смещения вблизи начальной границы указанного интервала, а также небольшое, но устойчивое отклонение от спектроскопического периода (взятого из работы Torres et al., 2019) на всём интервале. Последнее говорит о сложной природе модуляций, не сводимой к одному лишь орбитальному движению.

- На кривой блеска переменной TCR J07094936+1412280 также наблюдаются суперорбитальные модуляции (“сверхгорбы”), в которых прослеживаются ранняя, ординарная и поздняя стадии, сопровождаясь заметной эволюцией периода и формы сигнала. Орбитальный период системы предполагается равным наблюдаемому периоду ранних сверхгорбов,

составляющему  $0.05463^d$ ; отсюда можно косвенно получить верхнее ограничение на расстояние до системы в 230 пк.

**Аппробация результатов.** Основные результаты работы представлены на следующих российских и зарубежных конференциях:

1. Международная конференция “Compact white dwarf binaries: From SN Ia to gravitational wave sources”, г. Ереван, Армения, 15-21 сентября 2019.

Стендовый доклад: Shugarov S., Katysheva N., Sheyanov E., Zubareva A.

“Photometric study of the X-ray Nova MAXI J1820+070 in the optical range: first year of observation”

2. Международная конференция «Kolos 2023», г. Гуменне, Словакия, 25-28 октября 2023. Устный доклад: Shugarov S., Sheyanov E. «Evolution of superhumps of a new WZ Sge-type system in Gemini TCP J07094936+1412280»

3. Конференция молодых учёных ИНАСАН, 9 ноября 2023. Устный доклад: Шеянов Е.Г. «Optical and X-ray timing analysis of the 2018-2020 outburst and rebrightening of the black-hole transient MAXI J1820+070»

#### **Публикации по итогам работы:**

1. *Fuori M., Zampieri L., Burtovoi A. et al.* “Optical and X-ray timing analysis of the 2018–2020 outburst and rebrightening of the black hole transient MAXI J1820+070” // *Astronomy & Astrophysics*. – 2025. – Vol. 697, id.A222

Также готовится к публикации статья “Analysis of optical and colour variations in the brightness of WZ Sge-type stars TCP J07094936+1412280 and TCP J14225968+4122545” в соавторстве с С.Ю. Шугаровым и др.

**Личный вклад автора** включает:

- проведение оптических наблюдений исследуемых объектов в различных фотометрических полосах на различных телескопах Крымской астрономической станции МГУ им. М.В. Ломоносова в 2019 и 2022 годах;

- обработку изображений в программе MaxIm DL, включая стандартные процедуры учёта подложки, плоских полей и темнового тока, а также дополнительную коррекцию изображения в случае необходимости, обусловленной индивидуальными особенностями кадра, и последующие апертурные фотометрические измерения; все используемые наблюдения, за исключением привлекающихся данных Американской ассоциации наблюдателей переменных звёзд и Коллаборации ANS, были обработаны автором; набор обработанных данных насчитывает более 20 тысяч изображений;

- последующую программную обработку измеренных инструментальных значений блеска переменных и звёзд сравнения для получения конечных временных рядов, пригодных для дальнейшего анализа, и построения кривых блеска исследуемых источников;

- предварительный поиск периодических модуляций в полученных временных рядах при помощи программы Winefk;

- разработку метода поиска моментов максимума на зашумлённой кривой блеска путём полиномиальной аппроксимации данных с адаптивным варьированием временного интервала для достижения наибольшей достоверности и написание скриптов на языке python, реализующих данный метод;

- определение вышеуказанным методом нескольких десятков моментов максимума блеска внутри отдельных циклов переменности источника ТСП

J07094936+1412280 для построения O-C-диаграммы и анализа эволюции фотометрического периода;

- оценку некоторых параметров исследуемых систем на основании полученных данных;

- обзор доступной информации об исследуемых источниках для сопоставления полученных результатов.

### **Структура и объём работы:**

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 80 страниц, в ней содержится 19 рисунков и 2 таблицы, список цитируемой литературы включает в себя 112 наименований.

Во введении представлен общий обзор работы; обозначены цели, задачи и проблематика.

Первая глава посвящена начальному этапу работы, а именно накоплению и обработке фотометрической информации: рассмотрен выбор объектов, набор наблюдательных инструментов, проведение наблюдений и алгоритм обработки полученных изображений до получения временных рядов; приведены примеры полученных данных.

Вторая глава посвящена анализу вспышки переменной V3721 Oph. Приводится подробный обзор известных свойств рентгеновских двойных систем и доступной в литературе информации об исследуемом объекте. Рассматриваются наблюдаемые особенности фотометрического поведения источника, включая повторные подъёмы яркости на этапе спада вспышки, эволюцию показателей цвета и оцениваемой по ним цветовой температуры и быструю хаотическую переменность. Отдельное внимание уделяется периодическим модуляциям блеска, возникающим на одном из этапов вспышки,

и несколько запаздывающим относительно известного орбитального периода системы. Уточняется значение частоты модуляций, прослеживается эволюция их формы и амплитуды, производится сравнение наблюдаемой картины с открытыми рентгеновскими данными и результатами других работ; обсуждается предполагаемая природа модуляций.

В третьей главе исследуется вспышка катаклизмической переменной ТСР J07094936+1412280. Рассматриваются общие свойства подобных систем и их классификация. Описываются наблюдаемые суперорбитальные периодические модуляции блеска объекта, анализируется их форма и период, выделяются различные эволюционные стадии. На основании полученных данных предпринимаются попытки приблизительной оценки некоторых характеристик исследуемой системы.

В заключении приводится краткий обзор полученных результатов.

## **Глава 1. Получение и обработка фотометрических данных**

В основе настоящей работы лежат оригинальные широкополосные фотометрические наблюдения, полученные в 2018-2022 годах на различных телескопах и в различных спектральных полосах; при дальнейшем анализе кривых блеска для повышения точности привлекались также данные из других доступных источников. Начальными этапами работы являлись, таким образом, выбор целей для исследования, получение ПЗС-изображений объектов в интересующий нас период и последующая их обработка для проведения процедуры апертурной фотометрии. В результате были получены временные ряды, анализ которых производится в последующих главах.

### **1.1. Выбор объектов исследования**

По существующим оценкам, около половины всех звёзд в нашей Галактике входят в состав двойных и кратных систем. При достаточно малом расстоянии между компонентами, сопоставимом с их собственными размерами, в таких системах становится возможен обмен масс на том или ином этапе эволюции; в таком случае их называют тесными двойными (ТДС). Стадия обмена масс представляет собой повышенный интерес для исследования – с точки зрения как изучения физики происходящих при этом процессов, так и возможности получения дополнительных сведений о самих компонентах.

Тысячи подобных систем, относящихся к различным подтипам, уже изучены и каталогизированы. Гораздо большее число, однако, остаётся предметом для будущих исследований, так как обмен масс происходит, главным образом, в стационарном режиме, заметно активизируясь только во время вспышек; тесные двойные в спокойном состоянии могут не показывать заметной переменности блеска и доступны для наблюдения лишь на

сравнительно небольших расстояниях, в то время как вспышечная активность позволяет уверенно выявлять их в пределах нескольких килопарсек (а при достаточных амплитудах – и за пределами нашей Галактики). Таким образом, большую часть информации о ТДС приносят именно периоды скачкообразного возрастания светимости, сравнительно редкие и непродолжительные в масштабах промежутков между ними; в остальное же время большинство таких систем недоступно для детального изучения.

По этой причине одним из основных факторов при выборе объектов исследования стало наличие активной вспышки на момент выполнения работы (вкуче с отсутствием уже известных более ранних вспышек).

Достоверно показано, что вспышечная активность различных типов ТДС так или иначе связана с аккрецией вещества звезды-донора на компактный объект; характер, амплитуда и продолжительность вспышек сильно варьируются в зависимости от параметров системы, ключевым из которых является тип главного компонента. В роли главного компонента может выступать нейтронная звезда, чёрная дыра или белый карлик.

Аккреция на нейтронную звезду или чёрную дыру сопровождается высвобождением большего количества гравитационной энергии, более высокой температурой аккрецирующего вещества и, как следствие, значительным потоком излучения в рентгеновском диапазоне, из-за чего такие ТДС получили общее название рентгеновских двойных. Спектр их наблюдательных проявлений достаточно широк; в зависимости от массы вторичного компонента такие системы подразделяются на маломассивные (low mass X-ray binaries – LMXB) и массивные (HMXB). В свою очередь, среди LMXB выделяют барстеры, рентгеновские новые, микроквазары и другие подтипы, различающиеся механизмами и особенностями вспышечного поведения.

Более распространённым классом вспыхивающих ТДС являются системы, где аккреция вещества происходит на белый карлик. За такими объектами закрепилось общее название катаклизмических переменных; для них характерны в среднем меньшие амплитуды переменности и отсутствие сильно выраженного рентгеновского потока. Среди катаклизмических переменных различают множество разновидностей, оптическая активность которых обусловлена разными причинами: классические и повторные новые, где аккрецирующее вещество на поверхности белого карлика подвергается взрывному термоядерному горению; поляры, где процесс аккреции испытывает сильное влияние магнитного поля главного компонента; карликовые новые, или переменные типа U Gem, светимость которых скачкообразно меняется из-за смены режимов дисковой аккреции и т. п. В зависимости от особенностей вспышек карликовые новые относят к подтипам SS Cyg, Z Cam, SU UMa, WZ Sge и пр.

Отдельно отметим, что в результате длительной эволюции катаклизмических переменных предположительно возможны вспышки сверхновых типа Ia (в случае, если приток массы вследствие аккреции приводит к достижению белым карликом предела Чандрасекара).

В настоящей работе мы рассматриваем две тесных двойных системы с компактным объектом: рентгеновскую новую MAXI J1820+070 (RA=18<sup>h</sup>20<sup>m</sup>21.9<sup>s</sup>, Dec=+07°11'7.3", обозначение по ОКПЗ – V3721 Oph), продолжительная вспышка которой наблюдалась в 2018-2020 годах, и катаклизмическую переменную типа WZ Sge TCP J07094936+1412280 (RA=7<sup>h</sup>9<sup>m</sup>49.36<sup>s</sup>, Dec=+14°12'28"), вспыхивавшую в 2021-2022 годах. Несмотря на принадлежность источников к разным таксономическим группам и заметную разницу в масштабах энерговыделения, выбранные системы демонстрируют

ряд общих свойств (предполагаемый механизм вспышечной активности, суперорбитальные модуляции светимости в максимуме блеска и т.п.), что позволяет использовать общие подходы для их изучения – как на этапе получения данных, так и на этапе дальнейшего анализа.

## **1.2. Широкополосные фотометрические наблюдения переменных**

Для изучения рентгеновской новой V3721 Ori проводились наблюдения на семи оптических телескопах:

1. G1 – телескоп системы Максутова, диаметр главного зеркала 18 см, фокусное расстояние 2.2 м (обсерватория астрономического института Словацкой академии наук, Татранская Ломница, Словакия);
2. G2 – телескоп фирмы Цейсс системы Кассегрена, диаметр главного зеркала 60 см, фокусное расстояние 7.5 м (там же);
3. Цейсс-2 – такой же телескоп в Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ им М.В. Ломоносова (КАС МГУ);
4. Зеркальный телескоп им. Энгельгардта – телескоп системы Кассегрена, диаметр главного зеркала 125 см, фокусное расстояние 20 м (там же);
5. АЗТ-5 – телескоп системы Максутова, диаметр мениска 50 см, фокусное расстояние 2 м (там же);
6. Телескоп фирмы Цейсс в Специальной астрофизической обсерватории РАН, диаметром главного зеркала 1 м, фокусное расстояние 13,3 м;
7. Телескоп системы Ричи-Кретьена RC-600 Кавказской горной обсерватории (КГО МГУ), диаметр главного зеркала 60 см, фокусное расстояние 4,2 м.

Наблюдения охватывают временной промежуток с марта 2018 по июль 2022 года. В качестве приёмника излучения использовались ПЗС-матрицы различных моделей. Продолжительность экспозиций варьировалась от нескольких секунд (в периоды наибольшего блеска) до шести минут (в периоды минимума). Наблюдения велись в спектральных полосах, близких к U, B, V фотометрической системы Джонсона и R<sub>c</sub>, I<sub>c</sub> системы Кузинса; для регистрации объекта в минимуме блеска использовались также кадры без фильтра. Всего было получено около 20000 изображений в течение почти 200 ночей. Для дальнейшей обработки наблюдений записывались также темновые кадры, кадры подложки и плоских полей.

Те же приборы и процедуры применялись для изучения катаклизмической переменной TCR J07094936+1412280. Наблюдения объекта проводились только на телескопах G2 и Цейсс-2 в фотометрических полосах B, V, R<sub>c</sub>, I<sub>c</sub> и без фильтра (см. выше); полоса U не использовалась, так как блеск источника в данном диапазоне оказался недостаточен для приемной точности измерений. Набор данных включает около 4000 кадров, охватывая 17 ночей в период с декабря 2021 по сентябрь 2022 года. Основная часть изображений была получена в полосе R<sub>c</sub> (около 2000 кадров) и без фильтра (около 1000 кадров).

В работе также задействованы фотометрические наблюдения членов Американской ассоциации наблюдателей переменных звёзд (AAVSO), В. П. Горанского (ГАИШ МГУ) и Коллаборации ANS (Asiago Novae & Symbiotic stars Collaboration, Munari et al. 2012), позволяющие дополнить статистику и улучшить временное покрытие кривых блеска; часть из них выполнена в Слоановских широких полосах  $g'$ ,  $r'$  и  $i'$ . Для сопоставления оптического и рентгеновского потоков во время вспышки V3721 Ori привлекались данные космического аппарата NICER (Gendreau et al. 2012, 2016), осуществлявшего

регулярный мониторинг объекта с марта по ноябрь 2018 года в диапазоне от 1 до 12 кэВ.

### **1.3. Обработка изображений и получение временных рядов**

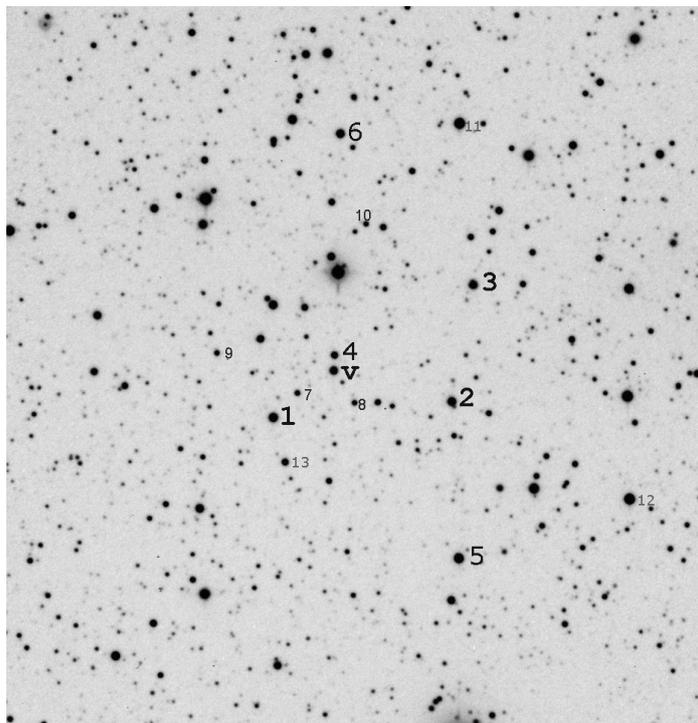
Первичная обработка (калибровка) каждого кадра состояла из учёта шума подложки, шума темнового тока и неоднородности чувствительности матрицы; для этих целей использовались соответственно кадры подложки (bias), темновые кадры (dark frame) и кадры плоского поля (flat field), полученные для соответствующих ночей. Как правило, было получено по несколько кадров каждого из этих типов для различных ночей наблюдений; в таком случае для каждого пикселя использовалось медианное значение количества отсчётов (т.е. формировались медианные кадры bias, dark и flat field, так называемые мастер-кадры).

В отдельных случаях приходилось также суммировать изображения поля зрения на протяжении ночи – когда сигнал на отдельных кадрах был слишком слаб (в частности, в полосе U).

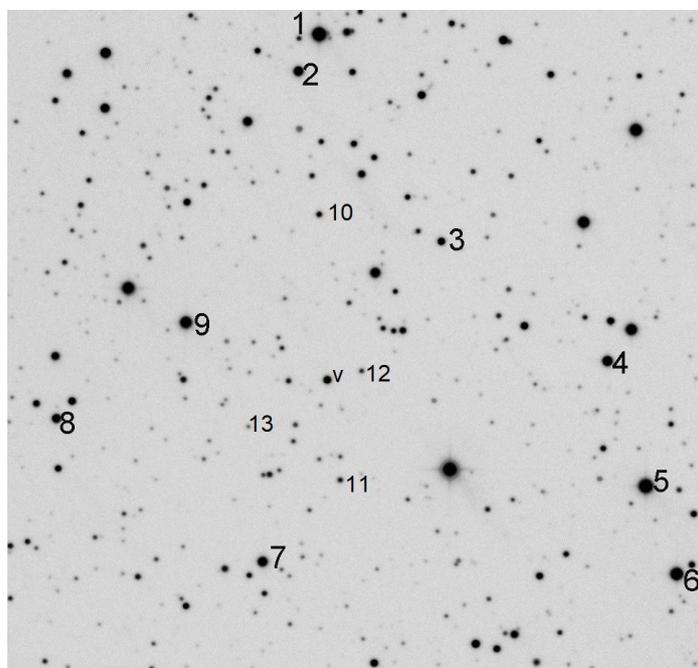
Калибровка кадров и первичная фотометрия осуществлялись при помощи программы MaxIm DL.

На этапе первичной фотометрии измерялась инструментальная звёздная величина исследуемого источника, а также звёзд сравнения и контрольных звёзд. Их набор выбирался разным в зависимости от поля зрения телескопа, спектральной полосы, продолжительности экспозиции и текущего блеска объекта исследования. В качестве звёзд сравнения и контрольных звёзд использовались такие, у которых не было обнаружено переменности, не возникало перенакопления сигнала при данной продолжительности экспозиции,

которые при этом находились достаточно близко к объекту и в то же время имели уровень сигнала, достаточный для надёжной фотометрии.



**Рисунок 1:** Карта окрестностей переменной V3721 Ori с указанием звёзд сравнения.



**Рисунок 2:** Карта окрестностей переменной TCR J07094936+1412280 с указанием звёзд сравнения.

Определение блеска объектов осуществлялось методом апертурной фотометрии. При этом поток от звезды измеряется внутри круглой апертуры, и из него вычитается фон неба, измеряемый в кольце вокруг звезды. Для этого необходимо выбрать: радиус апертуры – так, чтобы в неё попадало как можно больше света звезды, но как можно меньше фона неба и не попадал свет соседних звёзд; толщину промежутка между апертурой и кольцом – так, чтобы в кольцо не попадал свет от звезды; и толщину кольца – так, чтобы в него попадал только фон неба. Эти параметры подбирались индивидуально для каждой ночи в каждой спектральной полосе. В отдельных случаях, при наличии в кадре артефактов – дефектов матрицы, космических лучей или сторонних объектов, попадающих в апертуру либо кольцо и заметно влияющих на результат измерения, проводилась дополнительная обработка исходного изображения, при которой значение сигнала в “испорченном” пикселе заменялось усреднённым сигналом соседних пикселей.

Нуль-пункт шкалы звёздных величин задавался с помощью привязки к звездам, у которых известны точные UBVR<sub>I</sub>-величины (Landolt, 2009).

В результате первичной фотометрии серии из  $N$  кадров определялись инструментальные звёздные величины объекта  $m_i^0$  для каждого  $i$ -ого кадра и величины выбранных  $K$  звёзд  $m_i^j$  – для каждого  $i$ -ого кадра и каждой  $j$ -ой звезды. Далее вычислялась средняя по серии кадров величина для каждой из звёзд  $\tilde{m}^j = (\sum_{i=1}^N m_i^j) / N$  и считалась разность блеска между объектом и каждой звездой для каждого кадра  $\Delta m_i^j = m_i^0 - m_i^j$ . Сложив среднюю величину звезды с этой разностью, мы получаем оценку блеска объекта на основании сравнения с этой звездой  $M_i^j = \tilde{m}^j + \Delta m_i^j$ . Таким образом мы избавляемся от разницы между шкалами на разных кадрах. Наконец, усреднив для одного кадра оценки блеска объекта, полученные сравнением с каждой из звёзд, мы получим окончательную оценку блеска объекта на данном кадре:

$$\tilde{M}_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K M_i^j = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (\tilde{m}^j + \Delta m_i^j) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left[ m_i^0 - m_i^j + \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N m_{\alpha}^j \right]$$

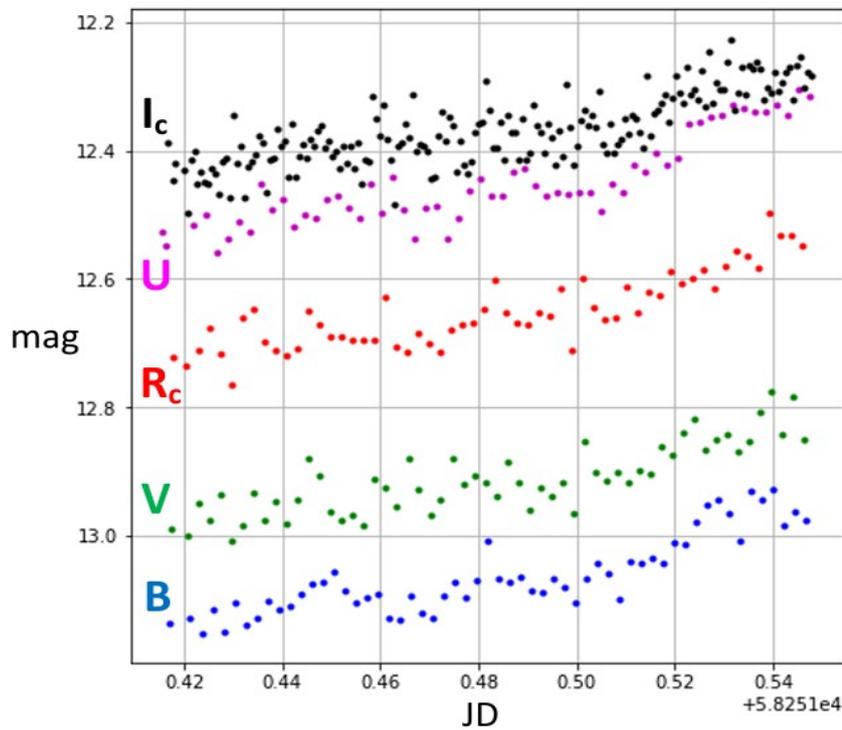
Как правило, для одной серии кадров производились измерения с двумя или несколькими различными радиусами апертуры, чтобы определить блеск исследуемого объекта независимо при разных апертурах и потом усреднить полученные значения, тем самым уменьшив погрешность, неизбежно возникающую при каждом таком измерении.

Итоговая величина погрешности определения блеска складывается, таким образом, из погрешностей первичной фотометрии и последующих математических преобразований и составляет, как правило, несколько сотых долей звёздной величины.

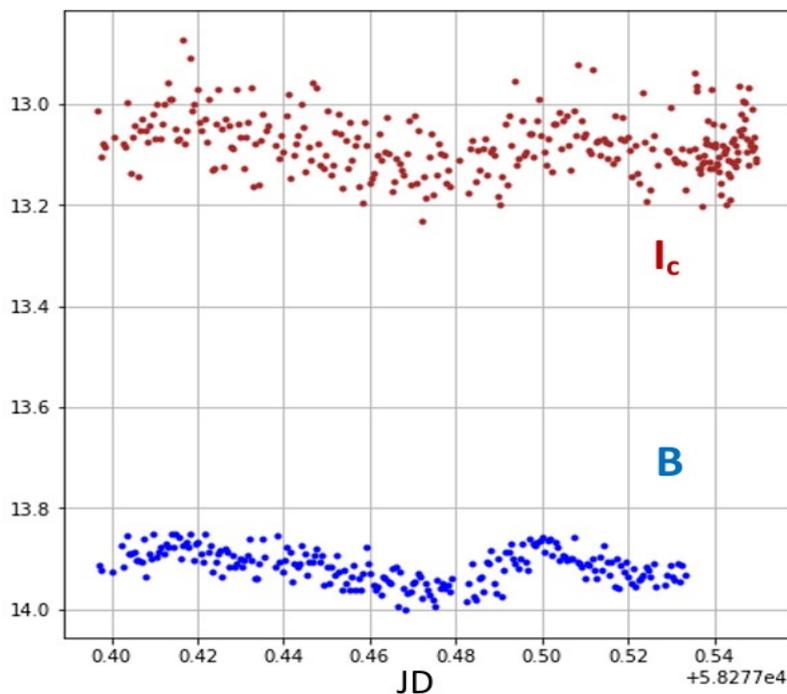
Результатом такой обработки являются ряды данных, содержащих время, когда был сделан кадр (в формате юлианской даты), и вычисленный блеск звезды на этом кадре. Теперь мы можем построить кривые блеска для отдельной ночи в отдельной полосе, либо, объединив несколько рядов – кривые блеска в нескольких полосах на произвольном интервале времени.

Полученные ряды данных, временное разрешение которых составляет в среднем десятки секунд, могут быть использованы для поиска периодических изменений блеска и изучения кратковременной переменности на протяжении ночи. При этом измеренные моменты времени приводятся к барицентру Солнечной системы, чтобы избежать искажения наблюдаемых фотометрических периодов, связанного с орбитальным и суточным вращением Земли. Для изучения же поведения объекта на больших временных масштабах (например, эволюции вспышки в целом) удобнее усреднять блеск звезды за ночь, чтобы сгладить кратковременные колебания, амплитуда которых достигает десятых долей звёздных величин, а также избавиться от разброса, вызванного погрешностью измерения.

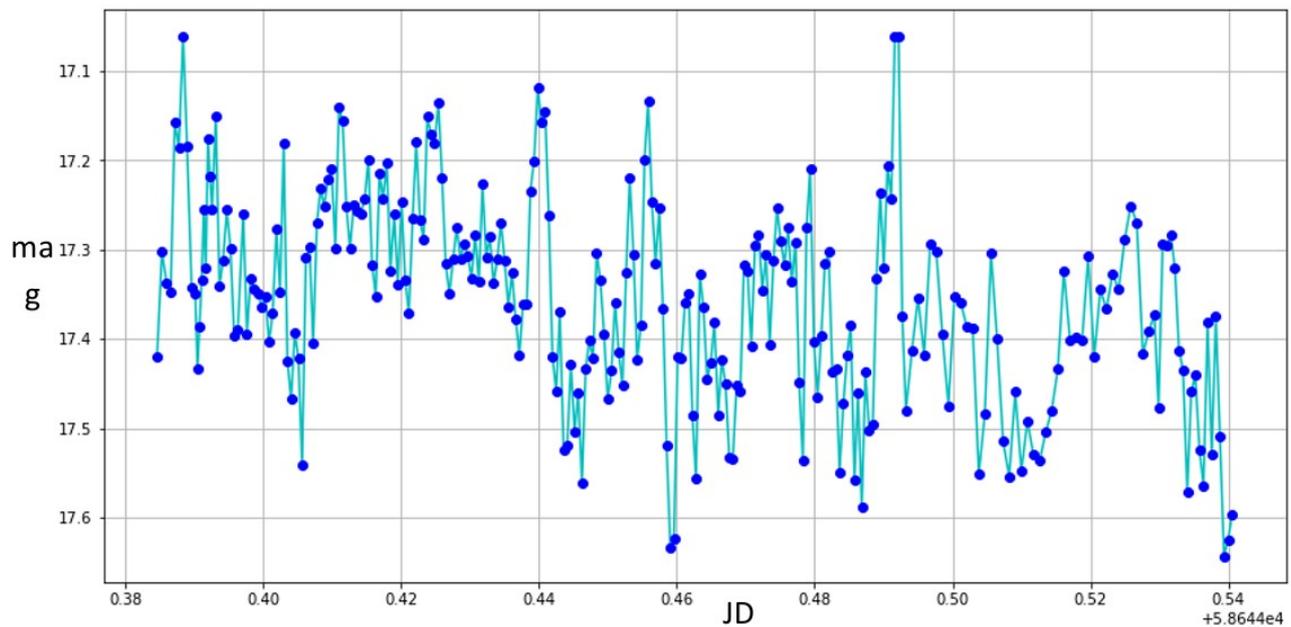
Ниже приведены примеры наблюдательных данных для отдельных ночей в разных фотометрических полосах (на примере переменной V3721 Oph):



**Рисунок 3:** Кривая блеска V3721 Oph на протяжении ночи 12-13 мая 2018 года (JD2458251, период спада вспышки) в спектральных полосах U, B, V,  $R_c$  и  $I_c$ . Прослеживается плавное изменение блеска в течение ночи.



**Рисунок 4:** Кривая блеска V3721 Oph на протяжении ночи 7-8 июня 2018 года (JD2458277, период спада вспышки) в спектральных полосах B и  $I_c$ . Видно, что кратковременная хаотическая переменность более выражена на больших длинах волн.



**Рисунок 5:** Кривая блеска V3721 Ori на протяжении ночи 9-10 июня 2019 года (JD2458644, период минимума блеска). Видны хаотические колебания блеска на масштабах от минут до часов.

Анализ полученных временных рядов представлен в следующих главах.

## Глава 2. Исследование рентгеновской новой v3721 Oph

В данной главе рассматривается переменность оптического блеска и цвета системы V3721 Oph, отождествляемой с рентгеновским транзиентным источником MAXI J1820+070 и классифицируемой как рентгеновская новая с предполагаемой чёрной дырой; производится анализ фотометрических наблюдений, охватывающих вспышку объекта в 2018-2020 годах и последующее возвращение в спокойное состояние.

Исследуется профиль кривой блеска в различных широких спектральных полосах; производится поиск периодических модуляций светимости на разных стадиях вспышки, сопоставление оптических данных с рентгеновскими, оценка физических параметров системы и сравнение полученных результатов с данными других исследований.

### 2.1. Общие свойства рентгеновских новых

Рентгеновские новые представляют собой разновидность более широкого класса маломассивных рентгеновских двойных систем (LMXB). Это тесные двойные звёздные системы, состоящие из релятивистского объекта (нейтронной звезды либо чёрной дыры) и вторичного компонента с массой, как правило, не превышающей  $2 M_{\text{sun}}$ , в роли которого могут выступать звезды главной последовательности и субгиганты поздних спектральных классов. Вторичный компонент в таких системах в результате собственной эволюции либо сокращения размеров орбиты заполняет свою полость Роша, и его вещество начинает перетекать через внутреннюю точку Лагранжа на релятивистский объект, формируя вокруг него аккреционный диск. Гравитационная энергия

аккрецирующего вещества переходит в тепловую и высвечивается преимущественно в рентгеновском диапазоне.

Перетекание вещества на компактный объект может происходить с разной скоростью, сопровождаясь различным темпом энерговыделения, и проходить либо в стационарном режиме, когда темп аккреции и светимость системы не претерпевают существенных изменений, либо во вспышечном. Амплитуды, формы и периодичности вспышек также варьируются, как и механизмы, их обуславливающие. Различные физические условия порождают различные наблюдаемые типы LMXB: рентгеновские новые, барстеры, микроквазары, яркие рентгеновские двойные галактического балджа и т.д. Почти 200 маломассивных рентгеновских двойных систем разных типов рассмотрены в каталоге Liu et al. (2007).

Помимо LMXB, существуют также рентгеновские двойные с массивным (от нескольких солнечных масс) вторичным компонентом (НМХВ); их проявления также весьма различны, но рентгеновских новых среди них не встречается.

Являясь в структурном смысле разновидностью LMXB, в наблюдательном смысле рентгеновские новые принадлежат к классу транзиентных рентгеновских источников (ХРТ). В зависимости от характерных энергий в спектре рентгеновские транзиенты подразделяются на мягкие ( $kT_{\text{brem}} < 15$  кэВ) и жёсткие ( $kT_{\text{brem}} > 15$  кэВ). Жёсткие транзиенты встречаются в НМХВ-системах; рентгеновские новые же являются преимущественно мягкими транзиентами.

От прочих рентгеновских источников рентгеновские новые отличает характерный тип вспышек: время от времени их рентгеновская светимость увеличивается на несколько порядков, достигая значений  $10^{37}$ - $10^{38}$  эрг/с.

Возрастание рентгеновского потока сопровождается всплеском и оптического излучения; характерная величина соотношения рентгеновской и оптической светимости в максимуме вспышки  $L_x/L_{\text{opt}}$  составляет порядка  $10^2$ - $10^3$ .

Чаще всего подъём рентгеновской светимости проходит очень быстро (за несколько дней), после чего следует экспоненциальный спад в течение нескольких месяцев; оптическая светимость ведёт себя аналогичным образом, однако и возрастает, и убывает, как правило, вдвое медленнее. При этом могут наблюдаться многие особенности на кривых блеска: продолжительное плато перед спадом; вспышки-предвестники; поярчания на этапе спада; серии из нескольких подряд идущих вспышек сравнимой амплитуды. Различные типы вспышечных профилей рентгеновских новых рассмотрены и проанализированы в обзоре Chen et al. (1997).

У многих рентгеновских новых наблюдались повторные вспышки. Между вспышками система пребывает в длительном минимуме блеска, сохраняющемся несколько лет или десятилетий; в спокойном состоянии и рентгеновский, и оптический потоки не превышают  $10^{33}$  эрг/с.

Благодаря вспышечному поведению рентгеновские новые и получили своё название (по аналогии с оптическими новыми, где аккреция происходит на белый карлик). Однако если у классических новых вспышки обусловлены термоядерным горением аккрецирующего вещества на поверхности главного компонента, то вспышки рентгеновских новых связывают с процессами, происходящими в диске. Стоит заметить, что взрывообразное термоядерное горение аккрецирующего вещества на поверхности компактного объекта в ЛМХВ также может иметь место, но при этом будет наблюдаться не рентгеновская новая, а рентгеновский барстер I типа. Такое явление возможно только в системах, где релятивистским компонентом является нейтронная звезда.

Предполагались различные механизмы вспышек рентгеновских новых. Хорошее согласование с наблюдениями показала модель тепловой неустойчивости в диске (Cannizo et al., 1995; Esin et al., 1997). Согласно этой модели, газ в аккреционном диске в спокойном состоянии имеет температуру ниже температуры ионизации водорода ( $\sim 7000$  К). При переходе же через это значение в газе происходит скачок непрозрачности, приводящий к увеличению турбулентной вязкости и, как следствие, резкому росту темпа аккреции на компактный объект и соответствующему увеличению рентгеновской светимости. Аналогичным образом объясняются вспышки карликовых новых, где в роли компактного объекта выступает белый карлик; но они не обладают заметной светимостью в рентгеновском диапазоне, их амплитуды существенно меньше, а продолжительность и периодичность вспышек – короче.

Природа излучения рентгеновских новых в оптическом и рентгеновском диапазоне несколько различна. В рентгеновский диапазон дают вклад две компоненты: мягкий (порядка нескольких кэВ) поток от внутренних частей аккреционного диска, представляющий собой комбинацию чернотельных излучений различной температуры (Shakura & Sunyaev, 1973), и более жёсткая компонента, претерпевшая комптоновское рассеяние на горячих ( $T \sim 50$  кэВ) электронах короны аккреционного диска. Соотношение интенсивностей этих двух компонент может быть разным в зависимости от текущего состояния системы.

Оптический же поток складывается из излучения вторичного компонента, внешнего края аккреционного диска, а во время вспышек – также релятивистских джетов. Предполагается, что блеск маломассивной звезды во время вспышки невелик; а вот соотношение светимостей диска и джетов может быть различным и является предметом дискуссий. Варьируется и соотношение яркостей диска и звезды в спокойном состоянии (как правило, диск тусклее).

Оптическая вспышка, сопровождающая рентгеновскую, объясняется эффектом рентгеновского прогрева внешнего края диска и вторичного компонента излучением от внутренних областей диска, а также, по-видимому, происходящей при вспышке активацией джетов. Характерной особенностью джетов является излучение в радиодиапазоне, но возможен вклад и в рентгеновский поток.

На основании различий в рентгеновском спектре у рентгеновских новых выделяют несколько состояний:

- низкое жёсткое (LH): степенной спектр с экспоненциальным завалом около 100 кэВ;
- высокое мягкое (HS): преобладает сверхмягкая чернотельная компонента с температурой  $\sim 1$  кэВ, полная светимость при этом больше (Tanaka & Shibasaki, 1996);
- промежуточное (IM): наблюдается при переходах между первыми двумя состояниями (Ebisawa et al., 1994);
- спокойное (выключенное);
- у некоторых систем также встречается очень высокое состояние.

Различные аккреционные состояния рентгеновских двойных рассматриваются, например, в работах Remillard & McClintock (2006) and Done et al. (2007).

Рентгеновские новые представляют интерес по ряду причин. Исследование их орбитальных характеристик позволяет оценивать массы релятивистских компонентов; большое время ядерной эволюции маломассивных вторичных компонентов и, как следствие, очень продолжительная стадия аккреции - сотни миллионов и миллиарды лет - делают весьма вероятным открытие релятивистских объектов именно в составе таких

систем. Так, с исследованием рентгеновских новых связаны успехи в открытии и изучении чёрных дыр звёздных масс. При этом обнаружено подобие между переменностью аккрецирующих чёрных дыр в двойных системах и переменностью активных галактических ядер (McHardy et al., 2006). Кроме того, предлагалось использовать суммарную рентгеновскую светимость LMXB в галактиках для оценки полных звёздных масс этих галактик (Gilfanov, 2004).

Предполагают, что в нашей Галактике существует, по меньшей мере, несколько сотен рентгеновских новых (Chen et al., 1997); но далеко не все из них на сегодняшний день открыты и исследованы. Важнейшие характеристики 16 хорошо изученных систем с описанием индивидуальных особенностей каждой из них можно найти в каталоге Cherepashchuk et al. (1996); в обзоре Cherepashchuk (2000) приведён список из 34 систем и их наблюдательных характеристик. Фотометрические, спектральные, статистические и динамические свойства рентгеновских новых, а также различия систем с нейтронными звёздами и чёрными дырами подробно рассмотрены в монографии А.М. Черепашука (2013). Краткие сведения о нескольких десятках объектов приводятся в Интернет-каталоге чёрных дыр звёздных масс в рентгеновских двойных системах BlackCAT (<http://www.astro.puc.cl/BlackCAT>).

## **2.2. История открытия и наблюдений переменной v3721 Oph**

Впервые вспышка рентгеновского излучения от исследуемой системы была зарегистрирована 11 марта 2018 года космическим экспериментом MAXI/GSC (Matsuoka et al., 2009); об этом сообщается в заметке Kawamuro et al. (2018). Яркий транзиентный объект был обнаружен в области с координатами  $RA=18^h20^m26^s$ ,  $Dec=+07^{\circ}02'13''$ ; погрешность определения местоположения составляла десятые доли градуса. Поскольку в эллипс ошибок не попадали никакие известные ранее рентгеновские источники, было

объявлено об открытии нового транзиента, который получил имя MAXI J1820+070.

Д. Денисенко (Denisenko, 2018) отождествил его с транзиентным оптическим источником ASASSN-18ey (RA=18<sup>h</sup>20<sup>m</sup>21,9<sup>s</sup> Dec=+07°11'7,3"), подъём блеска которого был выявлен 6 марта 2018 года проектом автоматического поиска сверхновых ASAS-SN (Shappee et al., 2014), и предположил, что он является катаклизмической переменной. Kennea et al. (2018) по наблюдениям рентгеновской космической обсерватории SWIFT подтвердили отождествление Денисенко.

Наблюдения на инструменте NICER 12-14 марта (Uttley et al., 2018) показали быстрый рост рентгеновского потока, наличие в рентгеновском спектре двух компонент – жёсткой степенной и мягкой, всполохи на масштабах минут и квазипериодические осцилляции с частотой 66 Гц, затухающие по мере возрастания блеска; был сделан вывод, что объект является двойной системой с чёрной дырой в жёстком состоянии. Спектр в диапазоне 15-200 кэВ, полученный на космическом телескопе SWIFT примерно в то же время, хорошо описывается комптоновским рассеянием на электронах с температурой 65 кэВ (Del Santo & Segreto, 2018).

В оптическом спектре, полученном 15 марта на телескопе SOAR (Bahramian et al., 2018) видна широкая эмиссионная линия H<sub>α</sub> (FWHM = 1150 км/с), слабая линия HeI 5875 Å и боуэновская бленда. В спектре, полученном на телескопе Keck I (Garnavich & Littlefield, 2018), видны также широкие линии поглощения H<sub>β</sub>, H<sub>γ</sub> и H<sub>δ</sub> с эмиссией в центре, характерные для аккреционного диска во время вспышки.

15 марта 2018 года у объекта была обнаружена быстрая хаотическая переменность в оптическом диапазоне на масштабах нескольких секунд, так называемый фликеринг, с характерной амплитудой 0.2-0.3<sup>m</sup> (Littlefield, 2018).

Фотометрия с миллисекундным разрешением (Sako et al., 2018) показала колебания блеска на масштабах ~10 мс, ~100 мс (с амплитудой до 100%) и ~100 с (с амплитудой 30%). Одновременные наблюдения на рентгеновском и ультрафиолетово-оптическом телескопах космической обсерватории SWIFT позволили установить, что оптические изменения потока коррелируют с рентгеновскими, отставая от них примерно на 10 секунд (Paice et al., 2018).

Gandhi et al. (2018) на основе наблюдений на камере ULTRACAM в фильтрах u', g' и i' продемонстрировали, что оптические вспышки на масштабах около секунды выражены красные (чем ярче объект, тем он краснее) и связали их с синхротронным излучением джета.

Информация о дальнейшей фотометрической и спектральной эволюции вспышки в оптическом, рентгеновском и радио- диапазонах приведена более чем в 50 заметках в The Astronomer's Telegram.

В марте-апреле 2018 года группой учёных из CAO РАН были проведён 30-дневный мониторинг объекта на радиотелескопе РАТАН-600 (Trushkin et al., 2018). Радиоизлучение демонстрировало медленный спад с 62 до 52 мЯн, нехарактерный для типичных микроквazarов, таких как GRS1915+105 и Cyg X-3, напоминая более постоянную кривую блеска НМХВ Cyg X-1. Показана корреляция с рентгеновским потоком.

Проводившиеся с марта по май наблюдения на рентгеновском телескопе INTEGRAL показали существенно различное поведение источника в диапазонах 20-50 кэВ (где доминировала комптонизированная компонента) и 100-300 кэВ («жёсткий хвост»). При этом кривая блеска для жёсткого хвоста

обнаружила сходство с кривой блеска в радиодиапазоне, что позволяет соотнести его с активностью джета (Roques & Jourdain, 2019).

В конце апреля-начале мая 2018 года была замечена регулярная переменность оптической светимости с амплитудой 0,03-0,1<sup>m</sup> и периодом 3,4 часа (Richmond, 2018) и предположена её связь с орбитальным вращением системы. В июне в полосе V стал проявляться отчётливый период 17 часов (минимумы блеска соответствовали эфемериде HJD 2458281.595+0.703E) с амплитудой 0,4<sup>m</sup> (Patterson et al., 2018), который мог соответствовать орбитальному вращению, прецессии аккреционного диска или так называемым сверхгорбам, возникающим в результате наложения этих процессов (что часто наблюдается у карликовых новых). Позднее Patterson et al. (2019) уточнили величину оптического периода и нашли его равным 0,69 суток.

В работе Shidatsu et al. (2018) приведены результаты длительного мониторинга вспышки в рентгеновском, оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах. Показано, что рентгеновская интенсивность объекта достигла максимума к концу марта, и затем плавно убывала до середины июня; оптическая и инфракрасная светимости коррелировали с рентгеновской. В этот период рентгеновский спектр описывался комптонизацией дискового излучения при электронной температуре  $\sim 50$  кэВ, что соответствует системе с чёрной дырой в низком жёстком состоянии. Значительные вариации рентгеновского потока на масштабах секунд сопровождались изменениями в спектре (при возрастании мощности излучения оно становилось жёстче), что может говорить о связи этих вариаций с колебаниями параметров горячего электронного облака, ответственного за комптонизацию. Моделирование распределения энергий в спектре по состоянию на конец марта (от рентгеновского до ближнего ИК-диапазона) позволяет предположить, что существенный вклад в оптическое и ближнее инфракрасное излучение системы вносит релятивистский джет.

Помимо этого, по архивным данным установлено, что источник проявлял слабую оптическую и инфракрасную активность до вспышки, когда рентгеновского сигнала от него ещё не наблюдалось.

22 сентября 2018 года у источника было замечено быстрое возрастание жёсткого рентгеновского излучения (Negoro et al., 2018). Вскоре было обнаружено радиоизлучение (Bright et al., 2018), свидетельствовавшее о повторной активации джета; однако в оптическом диапазоне первые признаки активации джета (подъём светимости и покраснение) были замечены лишь 12 октября (Baglio et al., 2018b).

Результаты мониторинга системы на разных длинах волн вплоть до октября 2018 года приводятся в работе Shidatsu et al. (2019). Авторы исследовали, среди прочего, соотношение рентгеновского потока в жёстком (6-20 кэВ) и мягком (2-6 кэВ) диапазоне. Они пришли к выводу, что с марта по июнь 2019 года источник находился в низком жёстком состоянии (LH), в июле быстро перешёл через промежуточное (IM) в высокое мягкое (HS), а в сентябре совершил обратный переход. Авторы заключили, что в низком жёстком состоянии в оптическом диапазоне преобладает излучение джета, а в высоком мягком и промежуточном – излучение внешнего края аккреционного диска. Помимо того, предпринята попытка оценки некоторых параметров системы.

Munoz-Darias et al. (2019) на основании оптической спектроскопии предположили наличие у системы дискового ветра во время жёсткого состояния, как в максимуме вспышки, так и во время её спада.

Оптические наблюдения первых 7 месяцев вспышки проводились также Thomas et al. (2019) в Южноафриканской астрономической обсерватории, в том числе на телескопе SALT. Высокоскоростная фотометрия показала

переменность на частотах 0,01-3 Гц. В спектре наблюдались сильные эмиссионные линии серии Бальмера, а также линии HeII и [CIII/NIII], модулированные 17-часовым периодом.

Наблюдения источника в гамма-диапазоне на протяжении этого же периода приведены в докладе Hoang et al. (2019).

После поярчания в октябре 2018 года блеск источника продолжил ослабевать, и к февралю 2019 года, возможно, достиг спокойного состояния (Russel et al., 2019), не показывая отчётливых тенденций ни к убыванию, ни к возрастанию (но сохраняя сильную переменность в пределах двух звёздных величин). Однако уже в марте начался новый подъём оптической светимости: с 7 по 11 марта блеск в полосе V возрос с 17,2<sup>m</sup> до 15,4<sup>m</sup> (Ulowetz et al., 2019). Вскоре ребрайтинг был подтверждён рентгеновскими (Bahramian et al., 2019), радиоволновыми (Williams et al., 2019) и оптическими (Baglio et al., 2019) наблюдениями.

Во время ребрайтинга в оптическом спектре источника наблюдались широкие эмиссионные линии водорода, нейтрального и ионизованного гелия (для H $\alpha$  FWHM составила 1100 км/с); усреднённые за ночь 24 марта значения блеска достигали значений B=14.23, V=13.91, R=13.60 (Munari et al., 2019).

Ребрайтинг, по сравнению с главной вспышкой, длившейся несколько месяцев, оказался непродолжительным и снова сменился спадом рентгеновского (Vozza et al., 2019; Tomsick & Homan, 2019) и оптического потока (Zampieri et al., 2019). К лету 2019 года блеск системы приблизился к минимуму, хотя колебания интенсивности с амплитудой 0,2-0,3<sup>m</sup> на масштабах десятков минут, наблюдавшиеся в начале августа, могли говорить о том, что спокойное состояние ещё не вполне достигнуто (Isogai et al., 2019).

Новый подъём оптической светимости был зарегистрирован в августе 2019 года (Hambusch et al., 2019). Следом начал расти и рентгеновский поток, показав увеличение в 5 раз за 2 дня (Xu et al., 2019). Ребрайтенинг наблюдался также в радио- (Bright et al., 2019) и ближнем инфракрасном диапазонах (Hankins et al., 2019). Продлившись около 70 дней, он снова сменился спокойным состоянием; наконец, последнее на сегодняшний день поярчение началось 18 февраля 2020 года (Adachi et al., 2020). Некоторая незначительная оптическая активность системы наблюдалась также в марте-апреле 2021 года (Baglio et al., 2021a, 2021b).

Попытки наблюдения источника в гамма-диапазоне на разных стадиях вспышки не привели к обнаружению заметного сигнала (Abe et al., 2022).

В Общем каталоге переменных звёзд (Samus et al., 2017) рентгеновская новая MAXI J1820+070 получила обозначение V3721 Oph (Kazarovets et al., 2019). Помимо вспышки 2018-2020 годов, которая и обратила на неё внимание исследователей, по архивным фотопластинкам DASCH (<http://dasch.rc.fas.harvard.edu>) у неё были идентифицированы исторические вспышки в 1898 и 1934 годах, из чего можно предположить, что они повторяются примерно раз в 40 лет (Kojiguchi et al., 2019).

### **2.3. Известные параметры системы**

Первые гипотезы о природе рентгеновского источника MAXI J1820+070 были высказаны Д. Денисенко (2018), который, отождествив его с оптическим транзиентом ASASSN-18eu, предположил звёздное происхождение вспышки, допустив, что объект может являться катаклизмической переменной.

Попытка более точно классифицировать источник была предпринята Baglio et al. (2018a). Проведя 13 марта 2018 года оптические наблюдения на

метровом роботе-телескопе обсерватории Las Cumbres, они измерили звёздные величины объекта  $g'=13.14^m$  и  $i'=13.08^m$ . Отождествив переменную со звездой из каталога PanStars, они нашли блеск в спокойном состоянии:  $g'=19.38^m$ ,  $i'=18.04^m$ , получив соответствующие амплитуды вспышки  $6,24^m$  и  $4,96^m$ . Из эмпирического соотношения период – амплитуда для мягких рентгеновских транзиентов (Shahbaz & Kuulkers, 1998) они предположили, что орбитальный период системы составляет менее 11,6 часов. Сравнив величину потока в оптическом и рентгеновском диапазонах, авторы пришли к выводу, что их соотношение у исследуемого объекта соответствует типичным значениям для рентгеновских двойных систем с главным компонентом – чёрной дырой. Авторы отметили, что у НМХВ не может быть такой амплитуды оптической вспышки, а у катаклизмических переменных не может быть такой высокой рентгеновской светимости, и заключили, что MAXI J1820 является ЛМХВ с чёрной дырой (что, однако, требовало дальнейшего спектрального и динамического подтверждения).

Последовавшие рентгеновские наблюдения на аппаратах NICER (Uttley et al., 2018) и SWIFT (Del Santo & Segreto, 2018) укрепили уверенность в такой классификации объекта.

Tucker et al. (2018), пользуясь данными Gaia DR2, оценили расстояние до системы в 3.06 кпк, и, взяв архивные данные о её блеске в спокойном состоянии, получили верхнюю оценку массы вторичного компонента  $1 M_{\text{sun}}$ .

В работе Gandhi et al. (2019) даны оценки расстояния до источника по данным Gaia DR2 несколькими методами, лежащие в диапазоне 3-4 кпк. На основании этого Shidatsu et al. (2019) дают нижнюю оценку массы чёрной дыры в  $4 M_{\text{sun}}$ , полученную по светимости при переходе из мягкого состояния в жёсткое, либо в  $7 M_{\text{sun}}$ , полученную по величине внутреннего радиуса

аккреционного диска в предположении невращающейся чёрной дыры и большого наклона орбиты.

Bharali et al., (2019), проведя широкополосное исследование спектра объекта, пришли к выводу, что он соответствует излучению относительно холодного геометрически тонкого оптически толстого ионизованного аккреционного диска с внутренним радиусом  $5.1^{+1.0}_{-0.7}$  гравитационных радиусов и наклоном  $29.8^{+3.0}_{-2.7}$  °. Обилие железа оценено в 4 солнечных.

Torres et al. (2019) провели спектроскопические наблюдения на 10-метровом Gran Telescopio Canarias и 4-метровом William Herschel Telescope и уточнили орбитальный период, функцию масс, отношение масс и спектральный класс вторичного компонента, а также оценили диапазон наклонов орбиты и соответствующий диапазон масс чёрной дыры – см. таблицу 1. Поскольку функция масс оказалась больше предела Оппенгеймера-Волкова, вопрос о природе релятивистского компонента был окончательно решён в пользу чёрной дыры. Позже массы компонент и наклонение орбиты были уточнены в работе Torres et al. (2020).

Радиоинтерферометрические наблюдения позволили Atri et al. (2020) оценить расстояние до системы по радиопараллаксу и использовать эту оценку для уточнения массы чёрной дыры и ориентации джета.

Оценка параметров джета приводится также в работе Tetarenko et al. (2021); на основании моделирования излучения в различных диапазонах авторы делают вывод о высокорелятивистском джете, уносящим из системы энергию, сопоставимую с величиной рентгеновской светимости.

В некоторых работах предпринимались и попытки определения спина чёрной дыры, однако в зависимости от используемых методов, опирающихся на различные наблюдательные данные, результат варьируется в очень широких

пределах от 0.1 – 0.2 (Guan et al., 2021; Zhao et al., 2021), что соответствует медленно вращающейся чёрной дыре, до довольно высокого значения 0.8 (Bhargava et al., 2021).

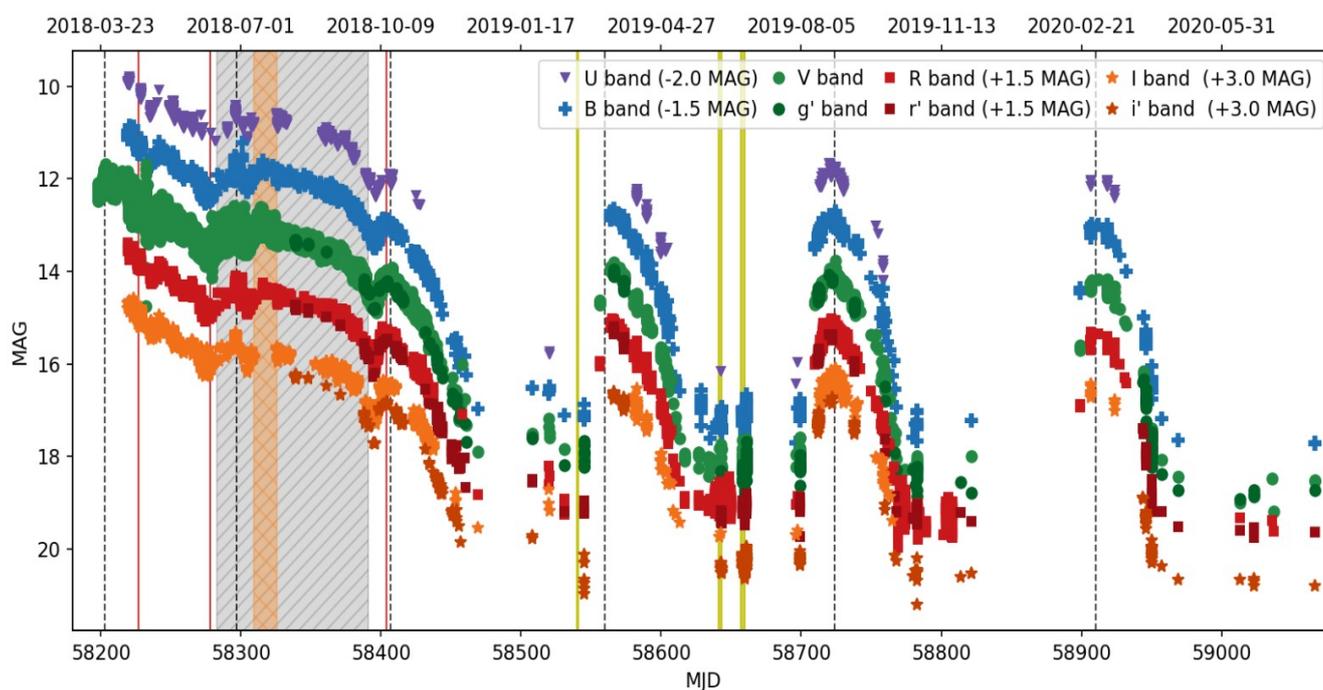
Оценки основных параметров системы, полученные в разных работах, приведены в таблице ниже. Косвенные оценки даны в скобках.

**Таблица 1:** Параметры v3721 Орh по данным разных работ.  $P_{orb}$  – орбитальный период,  $M_{BH}$  – масса чёрной дыры,  $q$  – отношение масс,  $M_2$  и С.К. – масса и спектральный класс вторичного компонента,  $i$  – наклонение орбиты,  $d$  – расстояние до системы

	$P_{orb}$	$M_{BH} (M_{sun})$	$q$	$M_2 (M_{sun})$	С.К.	$i$ (град.)	$d$ (кпк)
Baglio et al., 2018	(<11.6 <sup>h</sup> )						
Richmond, 2018	0.1417 <sup>d</sup>						
Patterson et al., 2018	0.703 <sup>d</sup>						
Tucker et al., 2018				(≤1)			3.06 <sup>+1.54</sup> <sub>-0.82</sub>
Shidatsu et al., 2018					(KV)		
Gandhi et al., 2019							3.23±1.14 3.46 <sup>+2.18</sup> <sub>-1.03</sub> 3.82 <sup>+2.89</sup> <sub>-1.23</sub>
Shidatsu et al., 2019		>4 (>7)				(>70)	
Patterson et al., 2019	<0.690 <sup>d</sup>	>4					
Bharali et al., 2019						(29.8 <sup>+3.0</sup> <sub>-2.7</sub> )	
Torres et al., 2019	0.6855 <sup>d</sup>	>5.18 (7-8)	0.12		K3-5	(69-77)	
Atri et al., 2020		9.2±1.3				(63±3)	2.96±0.33
Torres et al., 2020		5.73-8.34 (8.48 <sup>+0.79</sup> <sub>-0.72</sub> )	0.072 ±0.012	0.28-0.77 (0.61 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.12</sub> )		66-81	

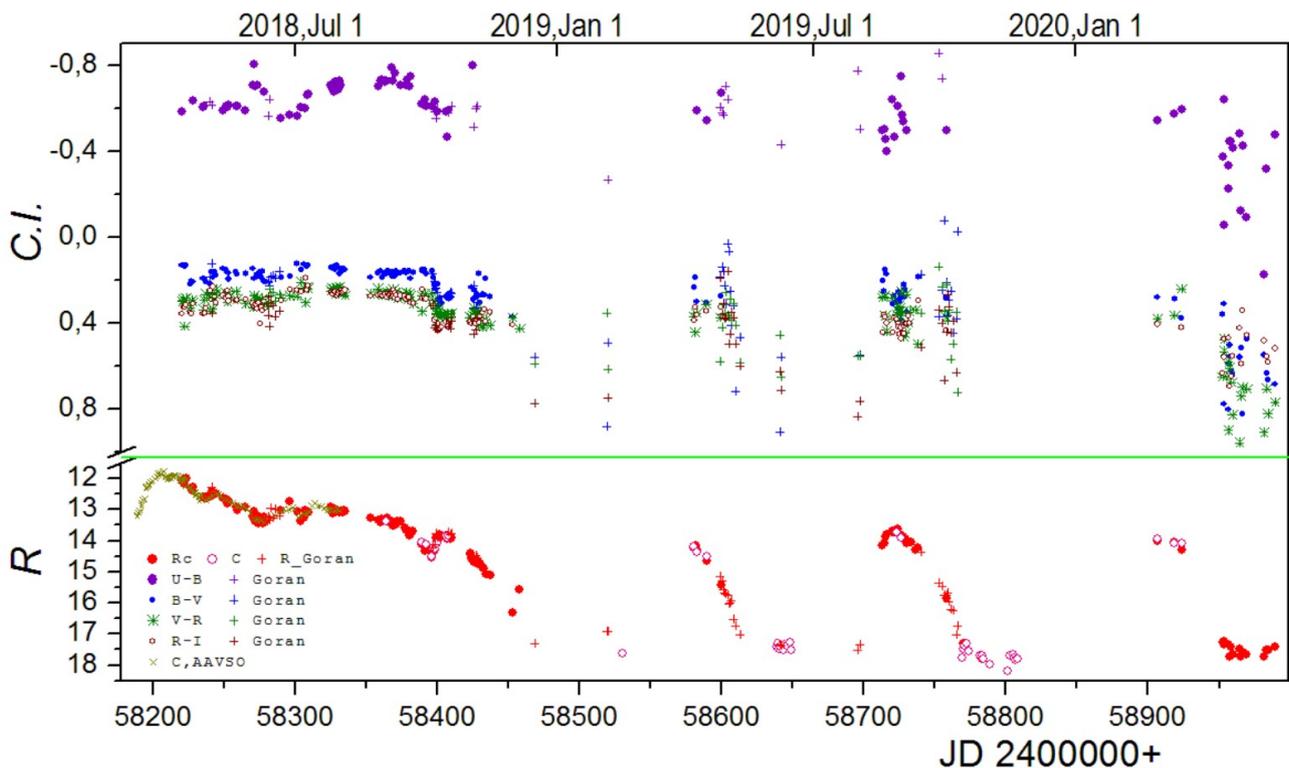
## 2.4. Фотометрические особенности вспышки 2018-2022 годов

Ниже представлена оптическая кривая блеска V3721 Ori во всех доступных фотометрических полосах с момента первого максимума блеска в марте 2018 года до окончательного возвращения в спокойное состояние в 2020 году (на основании наблюдений, указанных в главе 1); на графике опущены данные за 2021-2022 год, когда система продолжала пребывать в минимуме блеска. На протяжении вспышки зарегистрировано 5 повторных подъёмов светимости (ребрайтенингов); вспышечная активность демонстрирует сходный профиль во всех полосах. Приблизительные даты каждого максимума блеска обозначены пунктирными вертикальными линиями; интервалы между соседними максимумами монотонно возрастают, составляя 94, 110, 153 и 186 дней соответственно.



**Рисунок 6:** Кривые блеска V3721 Ori в различных оптических полосах с момента первого максимума после открытия источника по август 2020 года. Чёрные пунктирные вертикальные линии приблизительно соответствуют моментам максимума блеска; жёлтые вертикальные линии соответствуют моментам измерения орбитального периода Торресом и др. Серая заштрихованная область соответствует промежутку времени, когда в оптическом диапазоне наблюдались периодические колебания светимости; оранжевая область – времени регистрации соответствующих колебаний и в рентгеновском диапазоне.

Интересно проследить, как менялись различные показатели цвета во времени и сопоставить эти изменения с изменениями блеска системы. Нагляднее всего это можно сделать, построив в одном временном масштабе график зависимости показателей цвета от времени и кривую блеска в какой-нибудь из фотометрических полос:



**Рисунок 7:** График зависимости показателей цвета V3721 Oph (U-B, B-V, V-R<sub>c</sub>, R<sub>c</sub>-I<sub>c</sub>) от времени (наверху) и комбинированная кривая блеска (в полосе R<sub>c</sub> и без фильтра) на протяжении вспышки 2018-2020 годов.

Из представленного графика видно, что изменения блеска объекта сопровождаются и изменением распределения энергии в оптической части спектра. При этом различные показатели цвета ведут себя по-разному: если B-V, V-R<sub>c</sub> и R<sub>c</sub>-I<sub>c</sub> показывают хорошее согласование друг с другом, то U-B ведёт себя несколько иначе, и величина его вариаций более значительна. Это может говорить о том, что механизмы образования излучения в коротковолновой части оптического диапазона отличаются от таковых в длинноволновой его части.

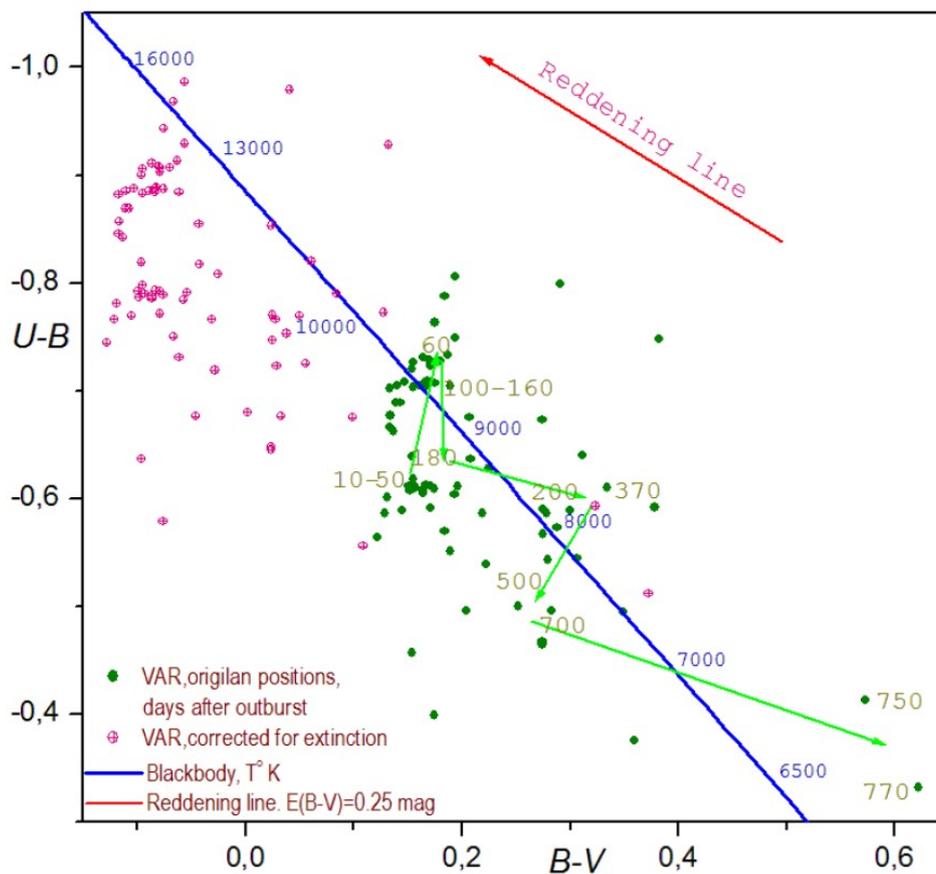
Можно заметить, что во время небольшого подъёма блеска в июле 2018 года, когда система, согласно рентгеновским наблюдениям, совершала переход из низкого жёсткого состояния в высокое мягкое (Shidatsu et al., 2019), все показатели цвета немного уменьшились, т.е. распределение энергий в оптической части спектра сдвинулось к коротковолновому краю; особенно сильное уменьшение показал индекс U-V.

В процессе же октябрьского поярчания 2018 года, при переходе системы из мягкого состояния в жёсткое, показатели цвета, напротив, совершили скачок в сторону бóльших значений; покраснение системы в ходе того ребрайтинга отмечали и Baglio et al. (2018b), связывая его с активностью джета.

В целом во время ребрайтингов октября 2018 года, марта-апреля 2019 года, августа 2019 года и февраля-марта 2020 года, а также последующих спадов блеска, показатели цвета вели себя более-менее одинаково, показывая более высокие значения, чем во вспышке, что соответствует более красному цвету источника. Показатели цвета, измеренные во время минимумов, в особенности в мае 2020 года, демонстрируют наиболее «красные» значения, что может быть связано с уменьшением эффективной температуры после «выключения» рентгеновского прогрева диска и вторичного компонента.

Имеющиеся фотометрические данные позволяют также проследить эволюцию вспышки на двуцветных диаграммах. Ниже представлена зависимость показателя цвета переменной U-V от B-V для разных моментов времени; на диаграмму также нанесена линия, соответствующая излучению абсолютно чёрного тела с разной температурой. Корректное отображение положений переменной на этой диаграмме осложнено большим расстоянием до неё, из-за чего становятся значительны эффекты межзвёздного поглощения и, как следствие, покраснения.

Величина покраснения переменной  $E(B-V)$  оценивалась в работах Shidatsu et al. (2018), Tucker et al. (2018) и других. Значения, приводимые разными исследователями, варьируются от 0,16 до 0,26; мы здесь будем полагать  $E(B-V)=0,25$ . Соответствующий избыток цвета  $E(U-B)$  должен в таком случае составлять  $0,72 * E(B-V) \approx 0,18$ . Таким образом, мы можем теперь восстановить предполагаемые исходные цвета системы. Зелёные точки на диаграмме соответствуют наблюдаемым значениям, розовые – непокрашенным; вектор смещения из-за покраснения изображён красной стрелкой. Для видимых показателей цвета объекта указан также примерный трек на протяжении вспышки.



**Рисунок 8:** Наблюдаемое и исправленное положение переменной V3721 Орh на двухцветной диаграмме U-B (B-V) для разных моментов времени на протяжении вспышки 2018-2020 годов. Цифрами возле точек обозначено количество дней, прошедших с начала вспышки.

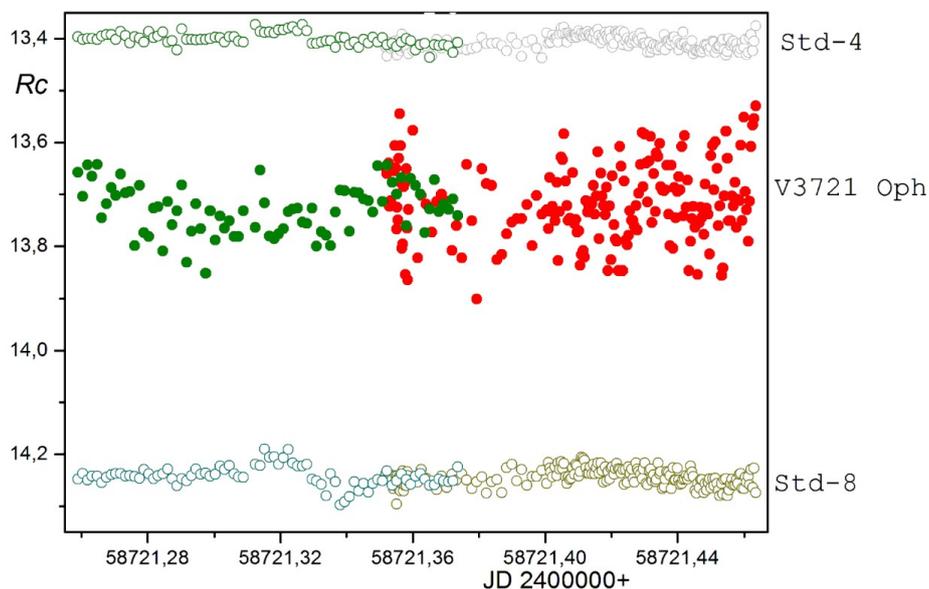
Как можно видеть, излучение переменной в максимуме главной вспышки неплохо соответствует чернотельному с цветовой температурой  $\sim 15000$  К; дальнейшая эволюция вспышки соответствует постепенному остыванию до  $\sim 7000$  К, что совпадает с температурой ионизации водорода и является теоретической границей между вспышечным и стабильным состояниями аккреционного диска (где, согласно существующим моделям, формируется большая часть оптического излучения рентгеновских новых). Повторение указанных процедур с показателями цвета  $B-V$  и  $V-R_c$  приводит к аналогичным выводам.

Помимо медленных фотометрических изменений по мере эволюции вспышки, многим рентгеновским новым свойственны быстрые хаотические колебания блеска (так называемый фликеринг и квазипериодические осцилляции – QPO); на иррегулярную переменность V3721 Oph на характерных временах от миллисекунд до десятков секунд в оптическом и рентгеновском диапазоне указывают Littlefield (2018), Sako et al. (2018), Paice et al. (2018), Thomas et al. (2019), Isogai et al. (2019) и др.

Быстрая переменность оказывается заметна и в полученных временных рядах, несмотря на более длительные времена экспозиции, что проявляется в разбросе измеренных значений, наиболее выраженном в полосе  $I_c$  (примерно вдвое сильнее, чем в полосе  $B$  – см. рис. 4 в §1.3). Это согласуется с результатом Gandhi et al. (2018), которые говорят о преимущественно красном цвете мерцаний во время главной вспышки.

Показательно также сравнение наблюдений, проводившихся одновременно на разных инструментах с разной продолжительностью экспозиции. Ниже приведены кривые блеска V3721 Oph и двух звезд сравнения

в полосе  $R_c$ , полученные на двух 60-сантиметровых телескопах ночью 25-26 августа 2019 года с экспозициями 35 с и 120 с. Видно, что разброс блеска переменной существенно выше при более высоком временном разрешении, в то время как на кадрах с продолжительной экспозицией быстрые колебания сглаживаются (значительно превосходя при этом дисперсию блеска звёзд сравнения). Это позволяет заключить, что характерные времена быстрой переменности источника во время августовского ребрайтинга 2019 года составляли менее 2 минут (что согласуется с результатами других авторов).

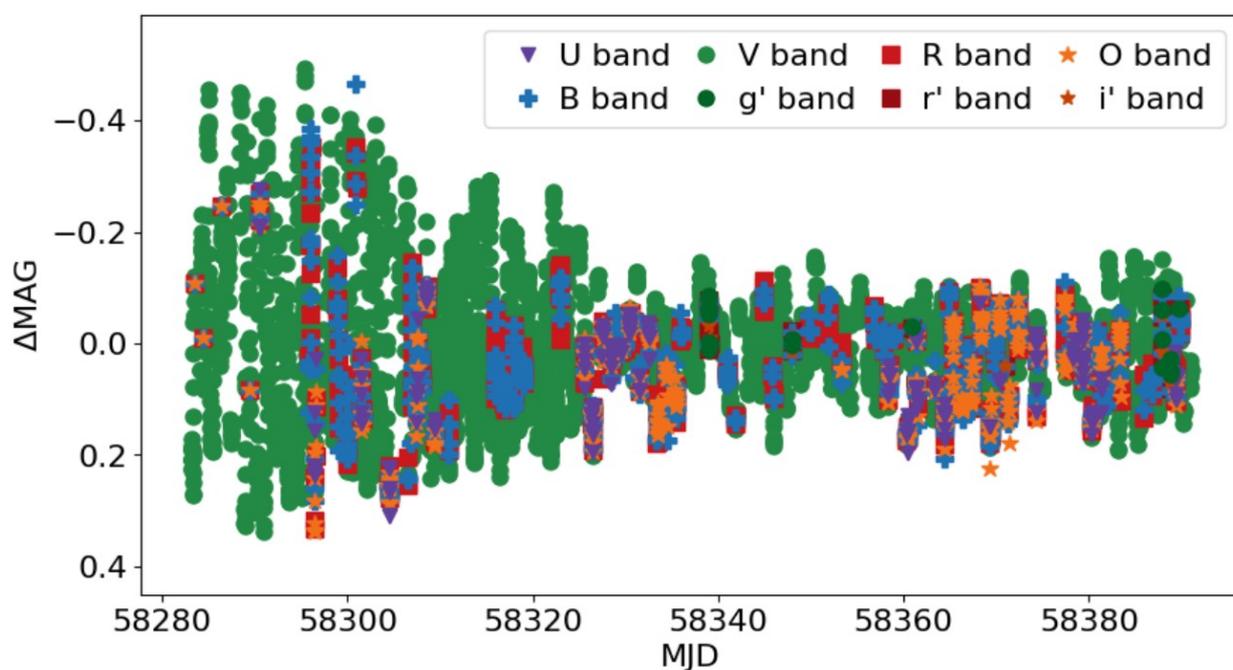


**Рисунок 9:** Кривая блеска V3721 Oph и двух звёзд сравнения в полосе  $R_c$  в ночь 25-26 августа 2019 года с экспозициями 120 с (слева) и 35 с (справа)

В минимуме на кривой блеска наблюдались также хаотические скачки продолжительностью от нескольких минут до часа (см. рис. 5 в §1.3). Наиболее же явные и регулярные модуляции светимости, замеченные на этапе медленного спада вспышки летом 2018 года и соответствующие периоду около 17 часов, рассматриваются в следующем разделе.

## 2.5. Исследование периодических модуляций блеска

Поиск возможных периодических колебаний светимости осуществлялся по фотометрическим данным, полученным в полосе V. Чтобы избавиться от влияния крупномасштабной переменности на временах, много больших искомого периода, из временных рядов предварительно вычиталась сглаженная кривая блеска, полученная усреднением за несколько последовательных ночей; результирующая кривая, отражающая только кратковременную переменность источника, представлена ниже.

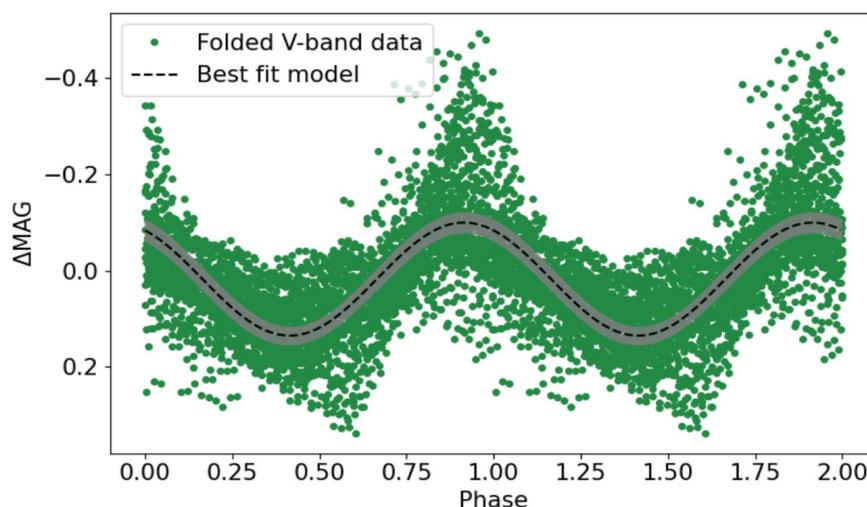


**Рисунок 10:** Кривые блеска V3721 Орh в разных полосах на промежутке MJD 58283-58391, выбранном для поиска периодичности, после вычета долговременного тренда.

Далее для поиска периодичности в полученных данных использовалась реализация обобщённого алгоритма Ломба-Скарла (Lomb, 1976; Scargle, 1982; VanderPlas, 2018) из программной библиотеки Astropy (Astropy Collaboration, 2018). Заметим, что без вычитания долговременного тренда на периодограмме наблюдается несколько ложных пиков.

Поиск осуществлялся на различных временных отрезках; варьирование эпохи начала и окончания отрезка показало, что наиболее уверенно периодическая переменность прослеживается на интервале MJD 58283-58391 (с июня по сентябрь 2018 года) и соответствует частоте  $1.4517 \text{ d}^{-1}$  (или периоду  $16.53^{\text{h}}$ ). Аппроксимация данных на указанном промежутке синусоидальной функцией методом Монте-Карло с марковскими цепями, реализованным в программном пакете emcee (Foreman-Mackey et al. 2013) подтвердила полученное значение частоты; параметры аппроксимационной синусоиды приведены в таблице 2.

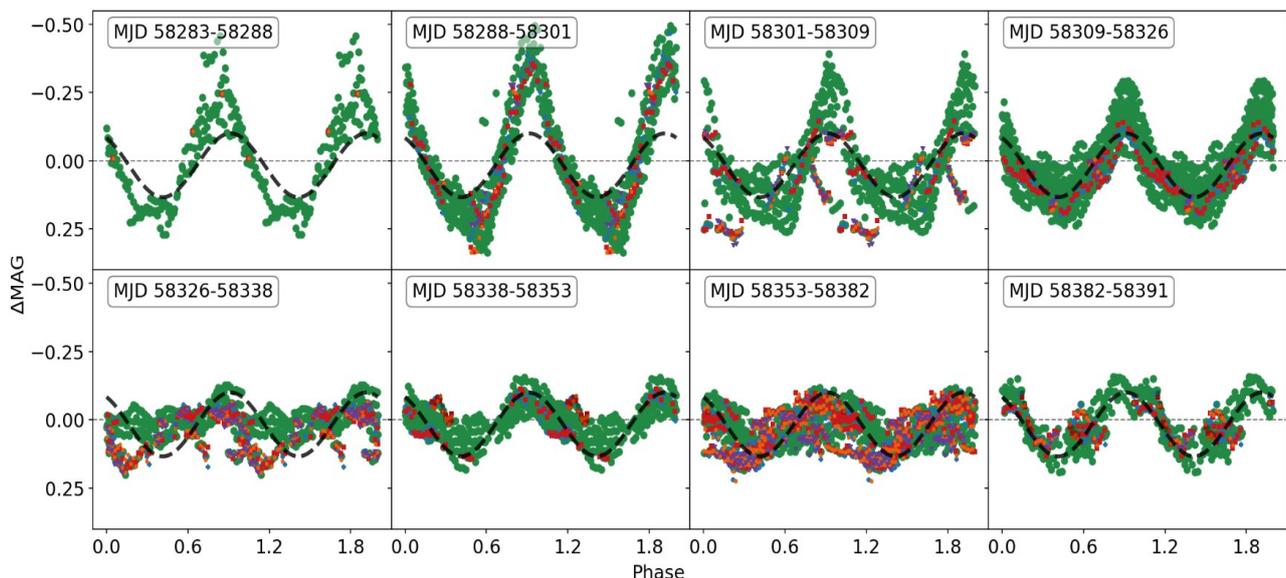
Ниже представлена кривая блеска источника в полосе V на выбранном промежутке (после вычета долговременного тренда), свёрнутая с найденным периодом. На график также нанесена аппроксимационная синусоидальная функция (чёрная линия) с доверительным интервалом  $2\sigma$  (серая полоса), показывающая неплохое соответствие наблюдательным данным (за исключением отклонений, сосредоточенных на отдельных временных интервалах, которые будут рассмотрены далее).



**Рисунок 11:** Кривая блеска V3721 Oph в фотометрической полосе V на отрезке MJD 58283-58391 после вычета долговременного тренда, свёрнутая с вычисленным периодом  $0.68885^{\text{d}}$ . Чёрной пунктирной кривой нанесена аппроксимационная синусоида.

Аналогичные процедуры (вычитание долговременного тренда, поиск оптической периодичности) были предприняты и для других фотометрических полос, но из-за меньшего временного покрытия и большей разрозненности данных определить независимо период по этим данным не удалось. Однако аппроксимация этих временных рядов синусоидальными функциями с фиксированным значением периода, полученным в полосе V, показала, что фазы этих функций для всех полос в пределах погрешности совпадают.

Разбиение исходных данных на интервалы меньшей длительности (порядка 10 дней) показывает, что найденные периодические колебания не являются строго регулярными на всём рассматриваемом промежутке времени, демонстрируя заметную эволюцию амплитуды, фазы и формы сигнала от интервала к интервалу, вплоть до временного исчезновения явной периодичности. Вариации профиля кривой блеска, свёрнутой с оптическим периодом на разных малых интервалах, представлены на следующем рисунке.



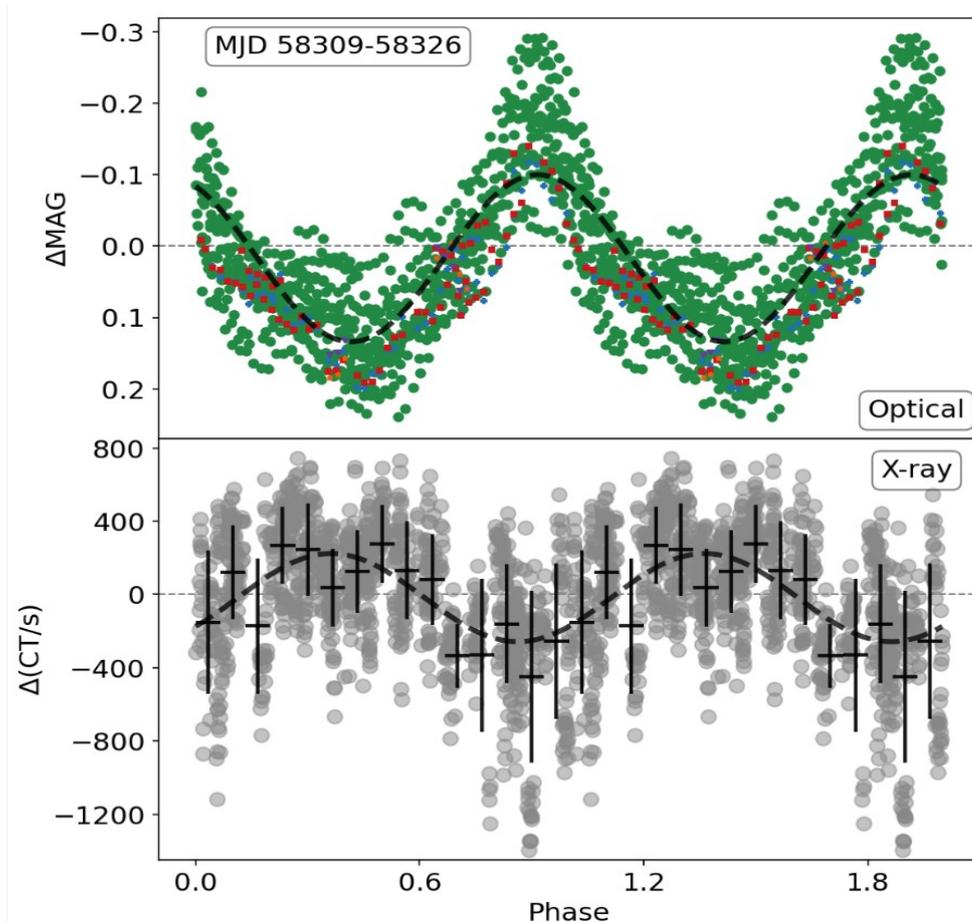
**Рисунок 12:** Эволюция амплитуды и формы периодического сигнала в кривой блеска V3721 Orp между MJD 58283 и MJD 58391. Чёрная линия соответствует средней аппроксимационной синусоиде для всего рассматриваемого промежутка.

Первые два интервала (MJD 58283-58288 и MJD 58288-58301) демонстрируют хорошо выраженные периодические осцилляции с амплитудой, заметно превышающей среднюю; при этом первый демонстрирует небольшое фазовое смещение. Далее период сохраняется, однако амплитуда постепенно убывает; в интервалах MJD 58301-58309 и MJD 58353-58382 снова наблюдаются отклонения по фазе. На интервале MJD 58326-58338 уверенно выявить периодичность не удаётся.

Периодические колебания на масштабах нескольких часов наблюдались не только у оптической, но и у рентгеновской светимости источника V3721 Ori.

По открытым данным миссии NICER периодические модуляции рентгеновского потока обнаруживаются на сравнительно небольшом промежутке MJD 58309-58326, во время которого оптическая периодичность также уверенно наблюдалась. Большой разброс сигнала не позволяет независимо определить рентгеновский период; свёртка с периодом, найденным выше, однако, показывает картину волнообразных рентгеновских колебаний примерно в противофазе с наблюдаемыми оптически, как показано на рисунке ниже.

Параметры синусоидальных функций, наилучшим образом аппроксимирующих периодический сигнал в оптическом и рентгеновском диапазонах приведены в таблице 2; согласно полученным коэффициентам, рентгеновские колебания опережают оптические по фазе примерно на 1.1π радиан (что соответствует временной задержке около 9.1 часа).



**Рисунок 13** Сопоставление оптических и рентгеновских колебаний светимости V3721 Ori на временном интервале MJD 58309-58326, свёрнутых с оптическим периодом  $0.68885^d$ . Цветные точки соответствуют оптическим данным, серые – рентгеновским; для последних также произведено бинирование по фазе. Пунктиром нанесены аппроксимационные синусоиды.

**Таблица 2** Результаты аппроксимации оптической и рентгеновской переменности V3721 Ori функцией  $\Delta(t) = A \sin(2\pi f[t - t_0] + \phi) + C$  в интервалах MJD 58283-58391 и MJD 58309-58326 соответственно

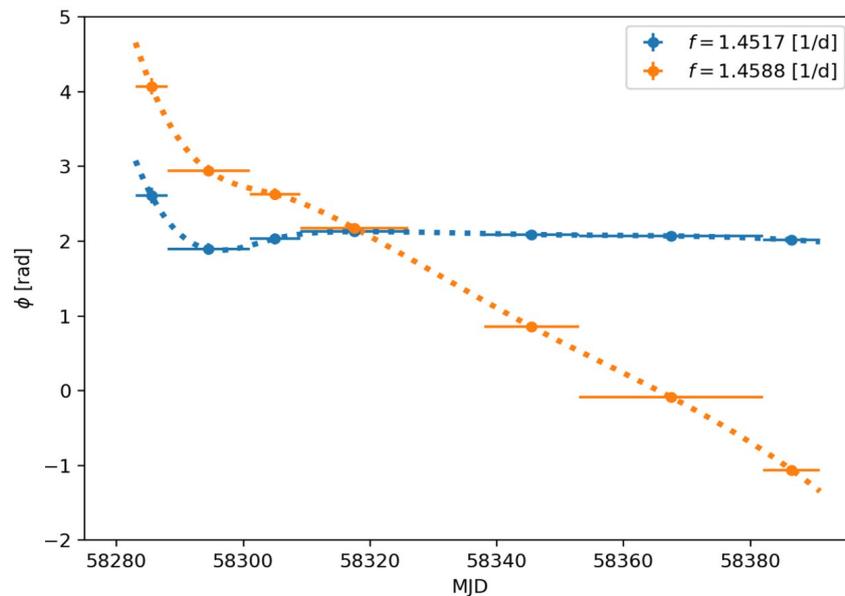
Parameters	Optical	X-ray
$t_0$ [MJD]	58283.0	58283.0
$f$ [1/d]	$1.4517 \pm 0.0001$	1.4517 (fixed)
$p$ [d]	$0.68885 \pm 0.00005$	0.68885 (fixed)
$A$	$0.117 \pm 0.002$ [MAG]	$240.7 \pm 15.5$ [ct/s]
$\phi$ [rad]	$0.67\pi \pm 0.03$	$1.77\pi \pm 0.07$
$C$	$0.017 \pm 0.002$ [MAG]	$-17.5 \pm 11.4$ [ct/s]

## 2.5. Интерпретация полученных данных

Попытки определения фотометрического периода системы V3721 Oph производятся во многих работах. Найденное выше значение  $0.68885^d$  на 0,5% превосходит величину орбитального периода, полученного Torres et al. (2019) по результатам спектроскопии в спокойном состоянии, и на 2% уступает оценке Patterson et al. (2018), сниженной в более поздней работе (Patterson et al., 2019) при выборе другого временного интервала.

Обе оценки Паттерсона основываются на сравнительно небольших интервалах наблюдений (15 и 35 дней), полученных вблизи момента возникновения периодических колебаний. Поиск периода в тех же интервалах по имеющимся фотометрическим данным воспроизводит результаты Паттерсона (в пределах  $1\sigma$ ); результат этот, однако, оказывается очень чувствителен к варьированию начальной и конечной границы интервала, что может быть вызвано быстрой эволюцией оптических модуляций в первые дни после их появления. При разбиении промежутка наблюдения модуляций на два (до и после MJD 58309) и аппроксимации каждой синусоидой частота, соответствующая первой половине, оказывается близка к более поздней оценке Паттерсона, а частота, соответствующая второй половине – к найденной для всего промежутка.

Аппроксимация сигнала на меньших интервалах синусоидой с фиксированной частотой  $1.4517 d^{-1}$ , рассчитанной ранее, показывает незначительные отклонения фазы на начальном этапе и её дальнейшую стабилизацию, как показано на графике ниже. Для сравнения приведены результаты аналогичной аппроксимации с частотой, равной орбитальному периоду; в таком случае фаза монотонно меняется, что соответствует систематическому отличию наблюдаемого периода от орбитального.



**Рисунок 14:** Эволюция фазы периодических колебаний блеска V3721 Ori при аппроксимации синусоидой с различными заданными частотами. Синие точки соответствуют частоте  $1.4517 \text{ d}^{-1}$ , найденной в настоящей работе, а оранжевые - орбитальной частоте  $1.4588 \text{ d}^{-1}$  (Torres et al., 2019)

Из вышеперечисленного можно заключить, что наблюдаемые фотометрические модуляции на всём протяжении обусловлены не орбитальным движением как таковым, но суперпозицией его с другими процессами – вопреки мнению Thomas et al. (2022), соотносящих модуляции после MJD 58309 с орбитальным периодом. В свою очередь их частота, вероятно, эволюционирует от значений, определённых Паттерсоном (2018, 2019) к найденным в настоящей работе, что хорошо согласуется также с O-C-диаграммой, полученной Niiijima et al. (2021).

Подобные модуляции с периодом, несколько превышающим орбитальный, получившие название “сверхгорбов”, часто наблюдаются при вспышках карликовых новых (Kato et al., 2009, 2017) и подробно рассматриваются в следующей главе. Сверхгорбы на кривой блеска V3721 Ori могут быть объяснены биением частот орбитального движения и прецессии деформированного диска (Ogilvie & Dubus, 2001). В этом предположении можно оценить период дисковой прецессии:

$$P_{\text{prec}} = (P_{\text{orb}}^{-1} - P_{\text{opt}}^{-1})^{-1} = 140^{\text{d}}$$

(где  $P_{\text{prec}}$ ,  $P_{\text{orb}}$  и  $P_{\text{opt}}$  – прецессионный, орбитальный и оптический периоды соответственно). Полученное значение близко к характерному времени между наблюдавшимися ребрайтенингами, но вопрос о взаимосвязи этих явлений остаётся открытым.

Заметим, что избыток периода сверхгорбов V3721 Orh над орбитальным  $\varepsilon = P_{\text{opt}} / P_{\text{orb}} - 1 = 0,0049$  является весьма малой величиной по сравнению со значениями, наблюдаемыми у карликовых новых, что может быть связано с малым соотношением масс компонент  $q = M_2/M_{\text{BH}}$ . Эмпирическое соотношение  $\varepsilon = 0.16(2)q + 0.25(7)q^2$  (Kato et al., 2009) при подстановке в него значения  $q$  из работы Torres et al. (2020) предсказывает для V3721 Orh оптический период, близкий к наблюдаемому на этапе возникновения сверхгорбов и измеренному Паттерсоном (2018, 2019). Средний же период, найденный выше, соответствовал бы экстремально малому соотношению масс  $q \approx 0.03$ , что существенно меньше значений, полученных различными авторами для данной системы.

Согласование оптических колебаний светимости с рентгеновскими говорит в пользу общности их физического происхождения, о чём свидетельствует также сходство их поведения по мере эволюции вспышки. Так, оптические модуляции наблюдаются преимущественно во время мягкого высокого спектрального состояния системы (появляясь незадолго до его начала и исчезая вскоре после его окончания); рентгеновские модуляции возникают сразу после перехода системы в это состояние и исчезают через несколько дней, что сопровождается непродолжительным затуханием и оптической периодичности. В дальнейшем оптические модуляции возобновляются, но с меньшей амплитудой. Отсюда можно предположить формирование и тех, и других в одной и той же геометрической области (например, деформированном диске).

## **Глава 3. Исследование катаклизмической переменной ТСР**

### **J07094936+1412280**

В данной главе производится анализ временных рядов, полученных в 2021-2022 годах во время вспышки карликовой новой ТСР J07094936+1412280, классифицируемой как переменная типа WZ Sge; исследуется периодическая оптическая переменность объекта на разных стадиях вспышки и производится оценка физических параметров системы.

### **3.1. Общие свойства карликовых новых**

Как уже упоминалось выше, катаклизмическими переменными называют тесные двойные системы на поздней стадии эволюции, роль главного компонента в которых играет белый карлик, а вторичного – звезда позднего спектрального класса, принадлежащая к главной последовательности (или же, в некоторых случаях, коричневый карлик). Отдельный подкласс катаклизмических переменных, проявляющих характерную вспышечную активность, представляют карликовые новые, или переменные типа U Gem.

Согласно современным моделям, вторичный компонент в таких системах полностью заполняет свой лепесток полости Роша, в результате чего вещество из внешних слоёв его фотосферы перетекает через внутреннюю точку Лагранжа в лепесток Роша главного компонента, формируя аккреционную струю. Из-за быстрого орбитального движения эта струя не падает непосредственно на компактный объект, а закручивается в направлении орбитального движения в спираль, что приводит к образованию аккреционного диска вокруг белого карлика (Warner, 1995; Hellier, 2001).

Как правило, основной вклад в оптическое излучение системы вносит именно аккреционный диск, а также струя и место их соударения. Развитие

нестабильностей в плазме диска может приводить к скачкообразному возрастанию светимости: при достижении критических значений температуры и плотности меняется вязкость плазмы, в результате чего вещество вблизи белого карлика вспыхивает, высвобождая большое количество энергии. Заметим, что такой же механизм вспышечной активности, описываемый моделью тепловой неустойчивости, предполагается и у рентгеновских новых. Типичным представителем карликовых новых является система SS Cyg, чей блеск раз в несколько недель возрастает примерно на  $4^m$  и возвращается к исходному в течение  $\sim 10$  дней.

Вспышки карликовых новых могут происходить по нескольким разным наблюдательным сценариям, на основании чего среди них выделяют переменные типа SS Cyg, Z Cam (для которых характерны более частые и слабые вспышки, а также явление продолжительной остановки блеска на промежуточном значении между максимальным и довспышечным состоянием) и SU UMa, включая подтипы ER UMa и WZ Sge.

Системам типа SU UMa присущи вспышки двух видов: «нормальные» и «сверхвспышки». Первые характеризуются спадом за несколько дней и амплитудой порядка  $2-4^m$ , а вторые — продолжительностью около двух недель и большими амплитудами, вплоть до  $6-8^m$ ; отметим, что это значение на  $2-3^m$  больше, чем у переменных типа SS Cyg. Как правило, на одну сверхвспышку в каждой такой системе приходится несколько нормальных.

Довольно редким подклассом переменных типа SU UMa является тип WZ Sge. Для него характерны самые короткие орбитальные периоды (обычно от 80 до 90 минут) и аномально длительные интервалы между сверхвспышками, от нескольких лет до десятилетий; при этом амплитуды переменности достигают  $9^m$ , а нормальные вспышки отсутствуют (Kato, 2015) — что создаёт риск

ошибочного отнесения таких систем к классическим новым при недостаточном числе наблюдений.

Средний интервал между последовательными сверхвспышками называют «сверхциклом» (у переменных типа SU UMa, кроме подтипа WZ Sge, на протяжении одного сверхцикла происходит несколько нормальных вспышек). Подтип ER UMa характеризуется наиболее короткими сверхциклами продолжительностью в десятки дней, на протяжении которых также происходят нормальные вспышки, а также наименьшими вспышечными амплитудами среди карликовых новых (несколько звёздных величин).

Сверхвспышки у переменных типа SU UMa сопровождаются волнообразными периодическими модуляциями блеска с небольшой амплитудой (обычно в пределах  $0,3^m$ ), период которых, как правило, превышает орбитальный на несколько процентов; такие модуляции, наблюдаемые также и у рентгеновских новых, принято называть «сверхгорбами». Их форма, период, амплитуда, регулярность и цветовые особенности заметно варьируются на протяжении вспышки, позволяя выделить стадии ранних, ординарных и поздних сверхгорбов.

Ранние сверхгорбы характерны для подтипа WZ Sge, проявляясь в первые дни после вспышки и демонстрируя два максимума за период с небольшой амплитудой в сотые доли звёздной величины (изредка доходящей до  $0,1-0,2^m$ ). Фотометрический период при этом сохраняется постоянным и не демонстрирует отличий от орбитального, определяемого спектроскопически (Kato, 2015; Tambo et al., 2021).

Ординарные сверхгорбы, приходящие на смену ранним, демонстрируют наибольшие значения амплитуды и периода, сопровождаясь уже только одним

максимумом, и разделяются на стадии А, В, С. На протяжении стадии А происходит возрастание амплитуды при постоянном сверхорбитальном периоде; к стадии В амплитуда достигает максимума, а период уменьшается. Кривая блеска в этот момент наиболее строго воспроизводится от цикла к циклу, позволяя с высокой точностью определять период — который на данном этапе уже не стабилен, а демонстрирует почти линейное изменение со временем; для количественного описания этого процесса используется показатель  $P_{\dot{}} = \dot{P}/P$ , выражающий скорость изменения фотометрического периода, относённую к самому периоду. Детальное исследование этого параметра на примере почти тысячи переменных, относящихся к типам SU UMa и WZ Sge, приводится в работах Kato et al. (2009, 2016, 2017); системы с коротким орбитальным периодом чаще демонстрируют положительное значение  $P_{\dot{}}$ .

На заключительной стадии С ординарные сверхгорбы становятся менее отчётливыми, характеризуясь меньшими значениями амплитуды и периода по сравнению со стадией В; к этому времени блеск системы ослабевает на несколько величин, и продолжает падать на стадии поздних сверхгорбов. Периодические вариации светимости на данном этапе выражены слабо, уступая по амплитуде неправильным квазипериодическим осцилляциям (QPO) или не наблюдаясь вовсе.

Как уже было сказано, одной из особенностей переменных типа WZ Sge является наличие стадии ранних сверхгорбов, возникающих после прохождения максимума вспышки. Их появление предположительно объясняется очень малым значением отношения масс компонентов  $q = M_{RD}/M_{WD}$ , в некоторых случаях составляющим около 0,1 (Kato, 2015). Геометрия полости Роша при этом оказывается такова, что при расширении аккреционного диска между

периодами обращения системы и внешнего края диска достигается резонанс 2:1 (Osaki & Meyer, 2002). Это приводит к возникновению в диске двухрукавных спиральных волн плотности, вызывающих двугорбые модуляции наблюдаемого блеска с периодом, равным орбитальному (Lin and Papaloizou, 1979); при уменьшении размеров диска резонанс исчезает.

Для систем типа SU UMa характерны большие массы вторичного компонента, чем у подтипа WZ Sge, и, как следствие, более высокие значения параметра  $q$ ; по этой причине полость Роша вокруг белого карлика имеет меньший размер, и резонанс 2:1 оказывается недостижим, что согласуется с отсутствием стадии ранних сверхгорбов при вспышках.

Формирование сверхгорбов ординарной стадии у переменных типа SU UMa и WZ Sge объясняется иным механизмом. Гидродинамическое моделирование аккреционных дисков (Whitehurst, 1988; Hirose & Osaki, 1990) показало, что при значениях отношения масс  $q < 0,25$  диск во время сверхвспышки становится приливно-неустойчивым и приобретает эксцентрическую форму. Возникающий при этом орбитальный резонанс 3:1 приводит к усилению турбулентности и увеличению скоростей переноса вещества, а также неравномерности излучения различных областей диска. Эта модель, предполагающая одновременное наличие как обычной тепловой неустойчивости диска, так и его приливной неустойчивости, называется «моделью ТТИ» (thermal and tidal instability) и объясняет появление как обычных, так и сверхвспышек в таких системах (Osaki, 1989, 2005).

Большая полуось эллиптического аккреционного диска испытывает медленную прецессию в направлении орбитального вращения системы с периодом, составляющим, как правило, несколько дней. В результате наложения орбитального и прецессионного движения наблюдаются колебания блеска с периодом, задаваемым биением соответствующих частот:

$$1/P_{sh} = 1/P_{orb} - 1/P_{prec} ,$$

где  $P_{orb}$  — орбитальный период двойной системы, а  $P_{prec}$  — период прецессии аккреционного диска.

В соответствии с данной моделью период сверхгорбов должен превышать орбитальный — и, как показывают наблюдения, обычно действительно превосходит его на несколько процентов; такие сверхгорбы принято называть «положительными». В некоторых системах, однако, наблюдаются «отрицательные» сверхгорбы, период которых несколько короче орбитального; это явление можно объяснить наклоном аккреционного диска к плоскости орбиты и одновременным нутационным и орбитальным движением в тесной двойной системе (Harvey et al., 1995; Wood & Burke, 2007; Wood et al., 2009; Thomas & Wood, 2015).

Заметим, что для объяснения поведения систем со сверхвспышками имеются модели, альтернативные ТГ1, например, модель «усиленного массопереноса»; существуют также теории, частично сочетающие различные механизмы (Nameury et al., 2000; Smak, 2009; Lasota, 2001, 2023).

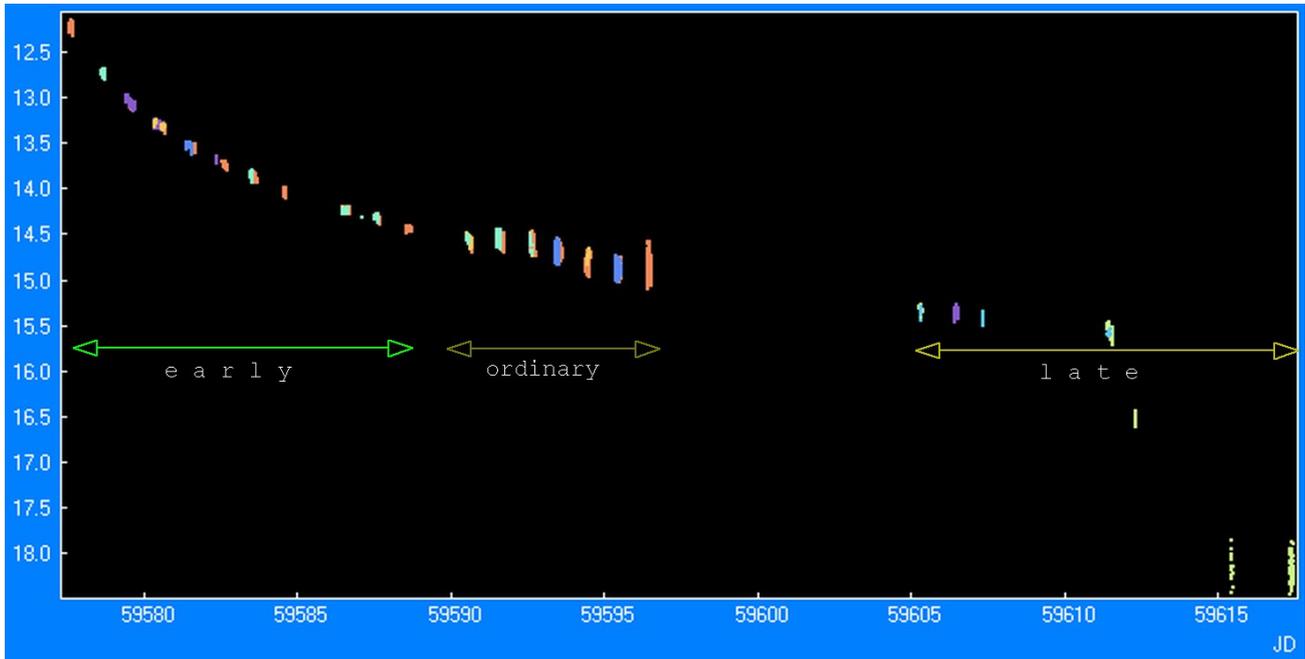
Некоторые переменные типа WZ Sge демонстрируют внезапные повторные увеличения блеска в конце сверхвспышки — называемые ребрайтингами или эхо-вспышками. Такие поярчания имеют меньшие продолжительности и амплитуды (как правило, в пределах 2-3<sup>m</sup>) и могут быть как однократными, так и многократными. Так, у системы EZ Lyn наблюдалось 11 повторных вспышек (Kato et al., 2009b), ASASSN-15po — 10 (Namekata et al. 2017), EG Snc — 6 (Kimura et al., 2021), MASTER OT J211258.65+242145.4 — 8 (Nakata et al., 2013). Попытка объяснения такого поведения представлена в работе Meyer & Meyer-Hofmeister (2015).

### 3.2. Вспышка переменной ТСР J07094936+1412280 в 2021-2022 годах

Исследуемая переменная была обнаружена во время вспышки 28 декабря 2021 года Тадаши Кодзимой, получив первоначально обозначение AT 2021agxs. Блеск источника на момент открытия составил  $13,6^m$  (в интегрированном свете) и на следующий день достиг значений  $B=12,13^m$ ,  $V=12,11^m$  и  $I_c=12,50^m$  (согласно данным Центрального бюро астрономических телеграм). 30 декабря было сообщено о регистрации в системе ранних сверхгорбов с периодом 0,0548 дня и амплитудой  $0,03^m$ , на основании чего был сделан вывод об отнесении системы к типу WZ Sge. 15 января 2022 года у переменной были замечены ординарные сверхгорбы с амплитудой  $0,15^m$ .

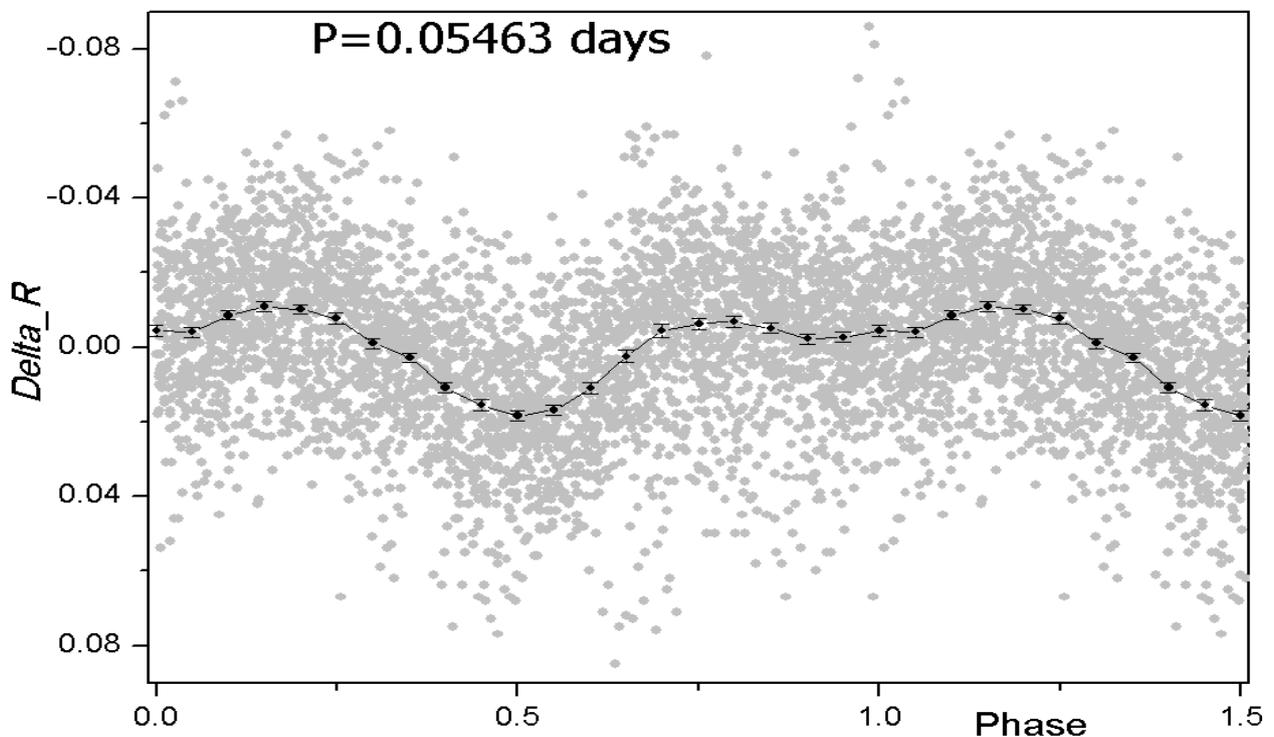
Наблюдения, проведённые в рамках данной работы, охватывают промежуток с 29 декабря 2021 года по 6 февраля 2022 года, а также 25-26 сентября 2022 года. Для получения более полной картины вспышки они были дополнены данными AAVSO за период 28 декабря — 26 января. Ниже приведена комбинированная кривая блеска переменной в полосе R (с использованием также измерений, полученных без фильтра и приведённых к этой полосе).

Максимальный зарегистрированный блеск по этим данным составляет около  $12,15^m$  и соответствует дате 28 декабря. Как видно на представленном графике, наиболее выраженные колебания блеска в течение ночи, соответствующие стадиям ординарных сверхгорбов, удалось наблюдать в течение недели с 10 по 16 января 2022 года, когда светимость экспоненциально снизилась примерно на  $2^m$  по сравнению с максимумом и далее убывала существенно медленнее. Около 1 февраля, по-видимому, происходит резкое выключение вспышки, после чего система оказывается в спокойном состоянии с блеском около  $18^m$  (на графике опущены наблюдения за сентябрь 2022 года, когда переменная также находилась в спокойном состоянии).



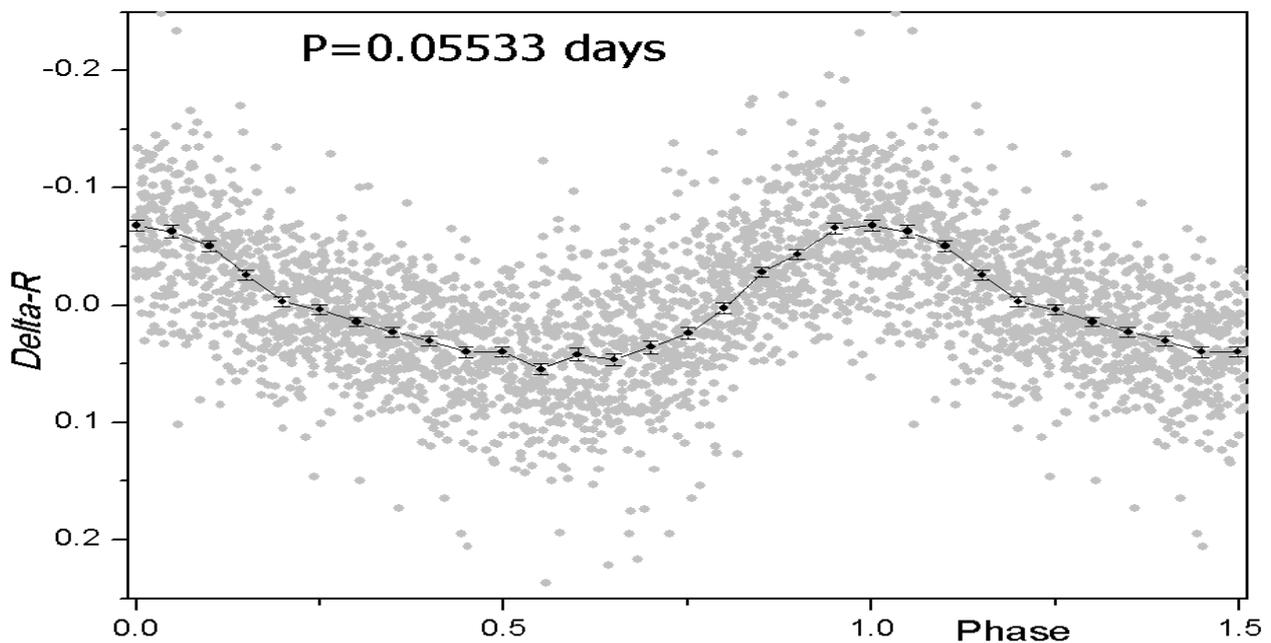
**Рисунок 15:** Кривая блеска вспышки ТСР J07094936+1412280 в полосе R, 28 декабря 2021 - 6 февраля 2022

Для дальнейшего анализа данные были разбиты на три временных отрезка, соответствующих различным стадиям развития сверхгорбов. В каждом отрезке определялся наиболее вероятный фотометрический период и строилась фазированная кривая блеска; результаты приведены ниже.



**Рисунок 16:** Фазированная кривая блеска ранних сверхгорбов ТСР J07094936+1412280 в полосе R

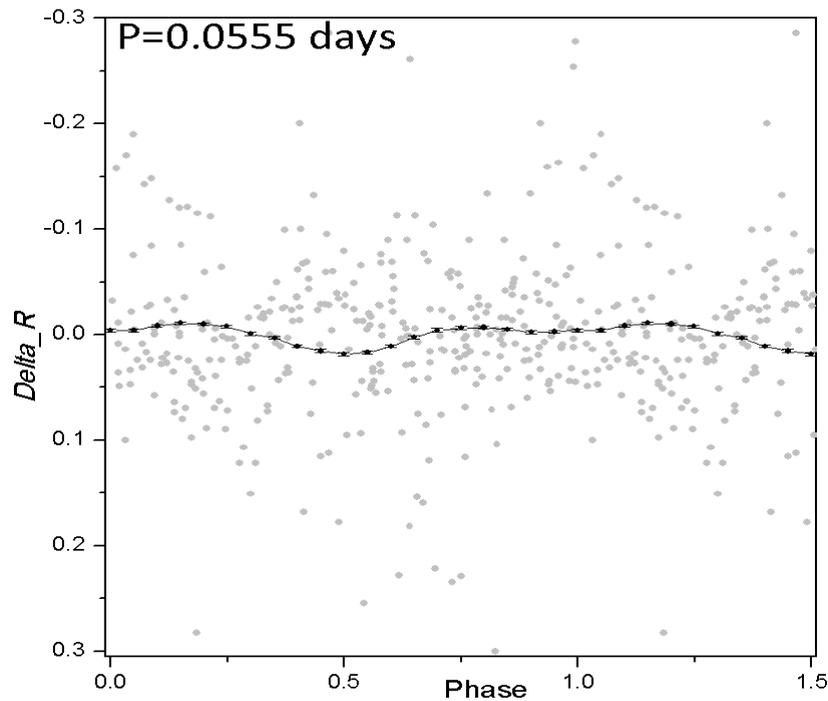
Ранние сверхгорбы с характерным двугорбым профилем наблюдались в первые 11 дней после максимума вспышки; это позволило уточнить полученное ранее значение фотометрического периода для этой стадии (совпадающего, согласно теории Осаки, с орбитальным). На графике выше представлена свёртка кривой блеска с наилучшим периодом, равным 0,05463 дня; наблюдаемая амплитуда модуляций находится в пределах нескольких сотых долей звёздной величины.



**Рисунок 17:** Фазированная кривая блеска обычных сверхгорбов TCP J07094936+1412280 в полосе R

На протяжении стадии обычных сверхгорбов их период, как было сказано выше, обычно непостоянен. На графике выше представлена свёртка со средним значением периода, равным 0,05533 дня; амплитуда колебаний блеска достигает значений около 0,1<sup>m</sup>.

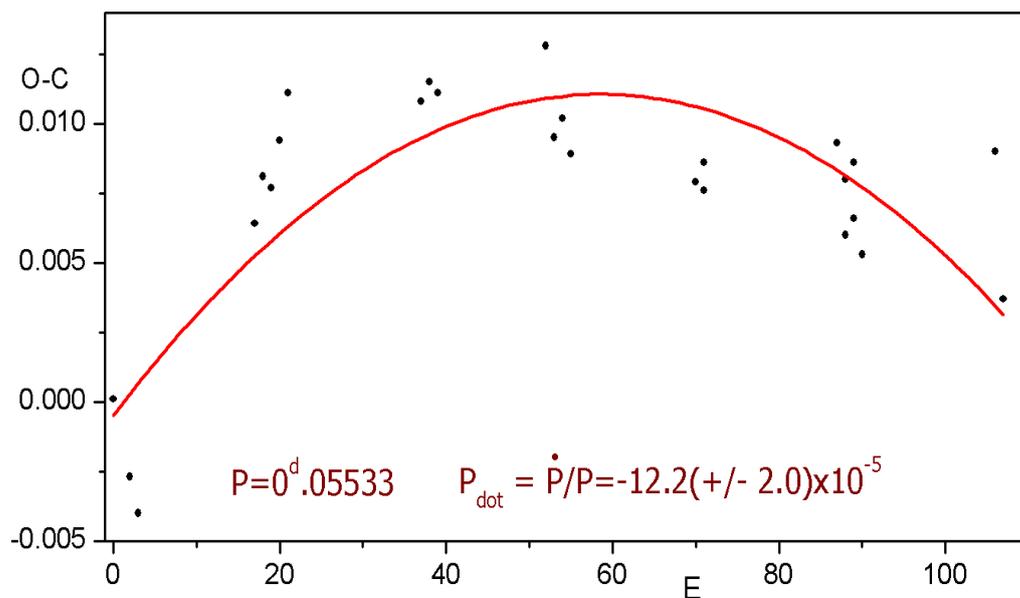
Вблизи момента окончания вспышки наблюдались поздние сверхгорбы с периодом около 0,0555 дня. Для них характерна нестабильность формы и амплитуды, так что чётко выраженной «волны» не выделяется.



**Рисунок 18:** Фазирующая кривая блеска поздних сверхгорбов ТСР J07094936+1412280 в полосе R

Для анализа эволюции фотометрического периода на стадии ординарных сверхгорбов определялись отдельно моменты максимума блеска для каждого цикла. Эта задача осложняется тем, что на волнообразный профиль кривой блеска накладываются локальные флуктуации и шумы, из-за чего в качестве момента максимума целесообразно принимать не точку с наибольшим инструментально измеренным значением, а момент, соответствующий экстремуму аппроксимационной функции, наилучшим образом описывающей поведение кривой на выбранном участке. В качестве таких функций использовались полиномы второй и третьей степени, а промежуток для аппроксимации подбирался в каждом цикле индивидуально — таким образом, чтобы, с одной стороны, не было существенным влияние локальных выбросов (искажающих картину на малых промежутках), а с другой — не требовалось введения членов высшего порядка (более корректно описывающих кривую на больших масштабах).

В результате были определены моменты максимумов блеска в 24 циклах (некоторые — дважды по данным двух разных телескопов). Ниже представлена диаграмма О-С для стадии ординарных сверхгорбов; при вычислении ожидаемых моментов максимума использовалось определённое ранее среднее значение периода 0,05533 дня.



**Рисунок 19:** О-С-диаграмма для стадии ординарных сверхгорбов ТСР J07094936+1412280 (чёрные точки) и аппроксимация её параболическим законом (красная кривая)

Как правило, на этой стадии период меняется почти линейно, и диаграмма О-С может быть, таким образом, описана параболическим законом, из коэффициентов которого вычисляется показатель скорости эволюции периода  $P_{\dot{}}$ . При аппроксимации полученной диаграммы параболой, нанесённой на график выше, значение этого параметра оказывается равным  $P_{\dot{}} = \dot{P}/P = -12.2 (\pm 2) \cdot 10^{-5}$ .

### 3.1. Оценка физических параметров системы

Найденные значения фотометрических периодов на разных стадиях позволяют, используя некоторые известные закономерности для переменных данного типа, косвенно оценить отдельные параметры исследуемой системы.

Так, период орбитального вращения компонентов  $P_{orb}$  должен, в соответствии с принятой моделью, совпадать с уже определённым фотометрическим периодом ранних сверхгорбов  $P_{ear}$ :

$$P_{orb} = P_{ear} = 0.05463 \text{ дня}$$

Теперь, зная средний период ординарных сверхгорбов  $P_{ord}$ , можно оценить период предполагаемой прецессии эллиптического аккреционного диска  $P_{prec}$  на этой стадии:

$$P_{prec} = (P_{orb}^{-1} - P_{ord}^{-1})^{-1} = 4,3 \text{ дня}$$

Одним из существенных параметров систем типа SU UMa является избыток  $\varepsilon$  фотометрического периода ординарных сверхгорбов над орбитальным, определяемый соотношением:

$$\varepsilon = (P_{ord}/P_{orb}) - 1$$

Из приведённых выше данных получаем значение  $\varepsilon = 0,013$ , достаточно типичное для систем этого типа. В свою очередь, параметр  $\varepsilon$  позволяет нам оценить соотношение масс компонентов  $q$ , пользуясь эмпирическим соотношением (Kato et al., 2009):

$$\varepsilon = 0.16(2)q + 0.25(7)q^2$$

Отсюда получаем значение  $q = 0,07$ , что хорошо согласуется с представлениями о системах типа WZ Sge.

Для красных карликов, являющихся вторичными компонентами катаклизмических переменных, существует общая приблизительная оценка массы в единицах массы Солнца (Knigge et al., 2011):

$$M_{RD} = 0.07 (\pm 0.015) M_{\odot}$$

Отсюда, зная отношение масс компонентов  $q = M_{RD} / M_{WD}$ , мы можем дать грубую оценку массы компактного объекта:

$$M_{WD} = M_{RD} / q = 1,0 (\pm 0,2) M_{\odot},$$

что соответствует диапазону масс белых карликов. В свою очередь, третий закон Кеплера позволяет на основании данных о массе и орбитальном периоде системы вычислить её большую полуось; исходя из вышеизложенных оценок получаем приблизительное значение  $a = 0,62 (\pm 0,04) R_{\odot}$  (где  $R_{\odot}$  — средний радиус Солнца).

Наконец, для звёзд типа SU UMa показана зависимость между орбитальным периодом и абсолютной звёздной величиной максимума сверхвспышки в полосе V (Kato, 2015):

$$M_{V_{\max}} = 5,64 - 0,259 \cdot P_{\text{orb}} (\text{ч}),$$

что предсказывает для TCR J07094936+1412280 абсолютный блеск  $M_{V_{\max}} = 5,30^m$ . Приняв максимальный видимый блеск в процессе вспышки за  $12,1^m$  и пренебрегая межзвёздным поглощением, можно оценить расстояние до системы в 230 пк. Влияние поглощения приводит к тому, что видимый блеск быстрее ослабевает с расстоянием, так что полученное нами значение по сути является верхней оценкой.

## Заклучение

В ходе настоящей работы:

- проведены оптические наблюдения выбранных переменных источников в широких фотометрических полосах U, B, V, R<sub>c</sub> I<sub>c</sub> и без фильтра;

- произведены обработка и фотометрические измерения более 20000 оригинальных изображений, полученных на протяжении около 200 различных ночей в период с марта 2018 по сентябрь 2022 года, с учётом индивидуальных особенностей этих изображений;

- получены временные ряды, охватывающие оптическую вспышку рентгеновской двойной системы V3721 Oph в 2018-2020 годах и вспышку катаклизмической переменной TCR J07094936+1412280 в 2021-2022 годах, а также моменты нахождения источников в спокойном состоянии;

- построены кривые блеска в различных полосах и исследованы фотометрические особенности вспышки V3721 Oph (с привлечением также данных из открытых источников); прослежена фотометрическая эволюция источника, получены приблизительные оценки эффективной температуры на разных стадиях вспышки и характерных времён быстрой переменности блеска, находящиеся в согласии с принятыми моделями и результатами других исследований;

- исследованы периодические модуляции оптической светимости системы V3721 Oph на протяжении вспышки; уточнено значение фотометрического периода, найденного отличным от орбитального и равным  $0.68885^d$ , а также границы временного интервала, внутри которого проявляются данные модуляции (MJD 58283 - MJD 58391); прослежена эволюция амплитуды, фазы и профиля модуляций на протяжении этого интервала; произведено

сопоставление полученных результатов с ренгеновскими данными и результатами других работ; сделано предположение о соответствии наблюдаемых суперорбитальных модуляций так называемым «сверхгорбам» и их связи с прецессией аккреционного диска, период предполагаемой прецессии которого оценен приблизительно в 140 дней;

- построена кривая блеска вспышки переменной ТСР J07094936+1412280; исследована эволюция суперорбитальных модуляций светимости источника: выделены стадии ранних, ординарных и поздних сверхгорбов и определён средний период на каждой стадии ( $0.05463^d$ ,  $0.05533^d$  и  $0.0555^d$ );

- определены моменты отдельных максимумов блеска в каждом наблюдавшемся сверхгорбе и оценено среднее значение скорости изменения периода путём аппроксимации О-С-диаграммы параболическим законом; на основании этих данных и известных эмпирических закономерностей получены приблизительные оценки физических параметров системы: орбитального периода ( $0.05463^d$ ), периода прецессии аккреционного диска ( $4.3^d$ ), отношения масс компонентов (0.07), массы главного компонента ( $1.0 \pm 0.2 M_{\text{SUN}}$ ), большой полуоси системы ( $0.62 \pm 0.04 R_{\text{SUN}}$ ) и расстояния до источника (в пределах 230 пк).

Полученные результаты могут в дальнейшем быть использованы для выявления и уточнения закономерностей в поведении рентгеновских и карликовых новых и углубления понимания физических процессов, стоящих за этими наблюдательными феноменами. Отдельный интерес представляет изучение общих свойств между системами этих двух типов, заметно отличающихся масштабами масс и энерговыделения, но объединяемых при этом подобием наблюдаемых проявлений (формы вспышек, суперорбитальных модуляций блеска) и общностью обуславливающих их механизмов.

## Список литературы

1. *Черпащук, 2013* – Черпащук А. М. Тесные двойные звезды. – Физматлит, г. Москва, 2013.
2. *Abe et al., 2022* — Abe, H., Abe, S., Acciari, V. A., et al. Gamma-ray observations of MAXI J1820+070 during the 2018 outburst // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — Vol. 517, no. 4 — P. 4736.
3. *Adachi et al., 2020* – Adachi R., Murata K.L., Oeda M. et al. Optical Rebrightening of MAXI J1820+070 = ASASSN-18ey // The Astronomer’s Telegram. – 2020. – Vol. 13502.
4. *Astropy Collaboration, 2018* — The Astropy Collaboration, Price-Whelan A.M., Sipőcz B.M. et al. The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package // The Astronomical Journal. — 2018. — Vol. 156, no. 3 — id. 123
5. *Atri et al., 2020* – Atri P., Miller-Jones J.C.A., Bahramian A. A radio parallax to the black hole X-ray binary MAXI J1820+070 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. – 2020. – Vol. 493, no. 1 – P. L81-L86.
6. *Baglio et al., 2018a* – Baglio M.C., Russel D.M., Lewis F. Optical observations of MAXI J1820+070 suggest it is a black hole X-ray binary // The Astronomer’s Telegram. – 2018. – Vol. 11418.
7. *Baglio et al., 2018b* – Baglio M.C., Russell D., Qaissieh T.A., Palado A., Gabuya A.; Shivkumar H., Lewis F. Optical brightening of MAXI J1820+070 over the soft to hard transition observed with LCO and the Al Sadeem Observatory // The Astronomer’s Telegram. – 2018. – Vol. 12128.

8. *Baglio et al., 2019 – Baglio M.C., Russel D.M., Al Qaissieh T., Palado A., Gabuya A., Lewis F.* Optical observations of MAXI J1820+070 confirm the rebrightening // *The Astronomer's Telegram.* – 2019. – Vol. 12596.
9. *Baglio et al., 2021a — Baglio, M. C., Homan, J., Russell, D. M., et al.* Low level optical activity in MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram.* — 2021. — Vol. 14582.
10. *Baglio et al., 2021b — Baglio, M.C., Russell, D.M., Saikia, P., Bramich, D.M., Lewis, F.* XB-NEWS detects a new outburst from the black hole X-ray binary MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram.* — 2021. — Vol. 14492.
11. *Bahramian et al., 2018 – Bahramian A., Strader J., Dage K.* SOAR/Goodman optical spectroscopy of MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram.* – 2018. – Vol. 11424.
12. *Bahramian et al., 2019 – Bahramian A., Motta S., Atri P., Miller-Jones J.* Swift observation of the rebrightening in MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram.* – 2019. – Vol. 12573.
13. *Bharali et al., 2019 – Bharali P., Chauhan J., Boruah K.* Broad-band spectral study of X-ray transient MAXI J1820+070 using Swift/XRT and NuSTAR // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2019. – Vol. 487, no. 4 — P. 5946-5951
14. *Bhargava et al., 2021 — Bhargava Y., Belloni T., Bhattacharya D., Motta S., Ponti G.* A timing-based estimate of the spin of the black hole in MAXI J1820+070 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2021. — Vol. 508, no. 2 – P. 3104-3110

15. *Bright et al., 2018 – Bright J., Motta S., Fender R.* AMI radio detection of the black hole candidate MAXI J1820+070 during the soft to hard transition // *The Astronomer's Telegram.* – 2018. – Vol. 12061.
16. *Bright et al., 2019 – Bright J., Williams D., Fender R., Woudt P., Miller-Jones, J.* Radio and X-ray Observations of the rebrightening Black Hole MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram.* – 2019. – Vol. 13041.
17. *Cannizzo et al., 1995 – Cannizzo J.K., Chen W., Livio M.* The Accretion Disk Limit Cycle Instability in Black Hole X-Ray Binaries // *The Astrophysical Journal.* – 1995. – Vol. 454 – P. 880.
18. *Chen et al., 1997 – Chen W., Shrader C.R., Livio M.* The properties of X-ray and optical light curves of X-ray novae // *The Astrophysical Journal.* – 1997. – Vol. 491 – P. 312.
19. *Cherepashchuk et al., 1996 – A. M. Cherepashchuk, N. A. Katysheva, T. S. Khruzina, S. Y. Shugarov.* Highly Evolved Close Binary Stars. Part I: Catalog // Gordon and Breach Publications Brussels, Belgium, 1996.
20. *Cherepashchuk, 2000 – Cherepashchuk A.M.* X-ray Nova Binary Systems // *Space Science Reviews.* – 2000. – Vol. 93, no 3/4 – P. 473-580.
21. *Del Santo & Segreto, 2018 – Del Santo, M., Segreto, A.* The hard X-ray spectrum of MAXI J1820+070 observed by Swift/BAT // *The Astronomer's Telegram.* – 2018. – Vol. 11427.
22. *Denisenko, 2018 – Denisenko D.* Optical follow-up of MAXI J1820+070 and possible identity with ASASSN-18ey // *The Astronomer's Telegram.* – 2018. – Vol. 11400.
23. *Done et al., 2007 – Done C., Gierliński M., Kubota, A.* Modelling the behaviour of accretion flows in X-ray binaries. Everything you always wanted to know about

accretion but were afraid to ask // *The Astronomy and Astrophysics Review*. — 2007. — Vol. 15, no. 1 — P. 1-66.

24. *Ebisawa et al., 1994* – *Ebisawa K., Ogawa M., Aoki T. et al.* Spectral Evolution of the Bright X-Ray Nova GS 1124-68 (Nova MUSCAE 1991) Observed with GINGA // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 1994. – Vol. 46 – P. 375-394.
25. *Esin et al., 1997* – *Esin A.A., McClintock J.M., Narayan R.* Advection-Dominated Accretion and the Spectral States of Black Hole X-Ray Binaries: Application to Nova Muscae 1991 // *The Astrophysical Journal*. – 1997. – Vol. 489. – P. 865.
26. *Foreman-Mackey et al., 2013* — *Foreman-Mackey D., Hogg D.W., Lang D., Goodman J.* emcee: The MCMC Hammer // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2013. — Vol. 125, no. 925 — P. 306.
27. *Gandhi et al., 2018* – *Gandhi P., Paice J.A., Littlefair S.P., Dhillon V.S., Chote P., Marsh T.R.* Red sub-second optical flaring in MAXI J1820+070 observed by ULTRACAM/NTT – *The Astronomer's Telegram*. – 2018. – Vol. 11437.
28. *Gandhi et al., 2019* – *Gandhi P., Anjali R., Johnson M.A.C., Paice J.A., Maccarone T.J.* Gaia DR2 Distances and Peculiar Velocities for Galactic Black Hole Transients // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2019. – Vol. 485, no. 2 – P. 2642-2655.
29. *Garnavich & Littlefield, 2018* – *Garnavich P., Littlefield C.* Optical Spectra of MAXI J1820+070 with Keck // *The Astronomer's Telegram*. – 2018. – Vol 11425.
30. *Gendreau et al., 2012* — *Gendreau K.C., Arzoumanian Z., Okajima T.* The Neutron star Interior Composition ExploreR (NICER): an Explorer mission of opportunity for soft x-ray timing spectroscopy // *Proceedings of the SPIE*. — 2012. — Vol. 8443 — 844313.

31. *Gendreau et al., 2016* — *Gendreau, K. C., Arzoumanian, Z., Adkins, P. W., et al.* The Neutron star Interior Composition Explorer (NICER): design and development // *Proceedings of the SPIE.* — 2016. — Vol. 9905 — 99051H.
32. *Gilfanov, 2004* — *Gilfanov M.* Low mass X-ray binaries as a stellar mass indicator for the host galaxy // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2004. – Vol. 349, no. 1 – P. 146-168.
33. *Guan et al., 2021* — *Guan J., Tao L., Qu J. L. et al.* Physical origin of the non-physical spin evolution of MAXI J1820 + 070 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2021. — Vol. 504, no. 2 — P. 2168-2180.
34. *Hambusch et al., 2019* — *Hambusch J., Ulowetz J., Vanmunster T., Cejudo D., Patterson J.* Optical Rebrightening of ASASSN-18ey = MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram.* – 2019. – Vol. 13014.
35. *Hameury et al., 2000* — *Hameuri J.M., Lasota J.P., Warner B.* The zoo of dwarf novae: illumination, evaporation and disc radius variation // *Astronomy and Astrophysics.* — 2000. — Vol. 353 — P. 244-252.
36. *Hankins et al., 2019* — *Hankins M., De K., Kasliwal M.M. et al.* Near-infrared brightening of MAXI J1820+070/ ASASSN18ey detected with Palomar Gattini-IR // *The Astronomer's Telegram.* – 2019. – Vol. 13044.
37. *Harvey et al., 1995* — *Harvey D., Skillman D.R., Patterson J., Ringwald F.A.* Superhumps in Cataclysmic Binaries. V. V503 Cygni // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific.* — 1995. — V. 107 — P. 551.
38. *Hellier, 2001* — *Hellier C.* *Cataclysmic Variable Stars* // Springer. — 2001.
39. *Hirose & Osaki, 1990* — *Hirose M., Osaki Y.* Hydrodynamic Simulations of Accretion Disks in Cataclysmic Variables: Superhump Phenomenon in SU UMa

Stars // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 1990. — Vol. 42 — P. 135-163.

40. *Hoang et al., 2019 – Hoang J., Molina E., Lopez M. et al.* Multiwavelength observation of MAXI J1820+070 with MAGIC, VERITAS and H.E.S.S. // 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Id. 696.
41. *Isogai et al., 2019 – Isogai K., Kato T., Kawauchi K. et al.* Small optical variations of MAXI J1820+070 (=ASASSN-18ey) in the faint state // The Astronomer's telegram. – 2019. – Vol. 12988.
42. *Kato et al., 2009 — Kato T., Imada A., Uemura M. et al.* Survey of Period Variations of Superhumps in SU UMa-Type Dwarf Novae // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 2009. — Vol. 61, no, sp2 — P. S395-S616.
43. *Kato et al., 2009b — Kato T., Pavlenko E., Maehara H.* SDSS J080434.20+510349.2: Eclipsing WZ Sge-Type Dwarf Nova with Multiple Rebrightenings // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 2009. — Vol. 61, no. 3 — P. 601-613
44. *Kato, 2015 — Kato T.* WZ Sge-type dwarf novae // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 2015. — Vol. 67, no. 6 — id. 108.
45. *Kato et al., 2016 — Kato T., Hamsch F.-J., Monard B.* Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. VIII. The eighth year (2015-2016) // Publications of the Astronomical Society of Japan — 2016 — Vol. 68, no. 4 — id. 65.
46. *Kato et al., 2017 — Kato T., Isogai K., Hamsch F.-J. et al.* Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. IX. The ninth year (2016-2017) // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 2017. — Vol. 69, no. 5 — id.75.

47. *Kawamuro et al., 2018* – *Kawamuro T., Negoro H., Yoneyama T. et al.*  
MAXI/GSC detection of a probable new X-ray transient MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram*. – 2018. – Vol. 11399.
48. *Kazarovets et al., 2019* — *Kazarovets E.V., Samus N.N., Durlevich O.V., Khruslov A.V., Kireeva N., Pastukhova E.N.* The 82nd Name-List of Variable Stars. Part II - RA 18hr to 20hr and Novae // *Peremennye Zvezdy*. — 2019. — Vol. 39 no. 3.
49. *Kennea et al., 2018* – *Kennea J.A., Marshall F.E., Page K.L. et al.* Swift detection of MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram*. – 2018. – Vol. 11403.
50. *Kimura et al., 2021* — *Kimura M., Isogai K., Kato T.* Multi-wavelength photometry during the 2018 superoutburst of the WZ Sge-type dwarf nova EG Cancri // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2021. — Vol. 73, no. 1 — P. 1-13.
51. *Knigge et al., 2011* — *Knigge C., Baraffe I., Patterson J.* The Evolution of Cataclysmic Variables as Revealed by Their Donor Stars // *The Astrophysical Journal Supplement*. — 2011. — Vol. 194, no. 2 — id. 28.
52. *Kojiguchi et al., 2019* – *Kojiguchi N., Kato T., Isogai K., Nogami D.* The 1898 and 1934 outbursts of ASASSN-18ey (= MAXI J1820+070) // *The Astronomer's Telegram*. – 2019. – Vol. 13066.
53. *Landolt, 2009* – *Landolt A.U.* UBVRI Photometric Standard Stars Around the Celestial Equator: Updates and Additions // *The Astrophysical Journal*. – 2009. – Vol. 137, no. 5 – P. 4186-4269.
54. *Lasota, 2001* — *Lasota J.P.* The disc instability model of dwarf novae and low-mass X-ray binary transients // *New Astronomy Reviews* — 2001 — Vol. 45, no. 7 — P. 449-508.

55. *Lasota, 2023* — *Lasota J.P.* Problems in the astrophysics of accretion onto compact celestial bodies // eprint arXiv:2311.16013
56. *Lin & Papaloizou, 1979* — *Lin D.N.C., Papaloizou J.* Tidal torques on accretion discs in binary systems with extreme mass ratios. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 1979. — Vol. 186 — P. 799-812.
57. *Littlefield, 2018* – *Littlefield C.* Fast optical flaring in the suspected black-hole binary MAXI J1820+070 (ASASSN-18ey) // *The Astronomer's Telegram.* – 2018. – Vol. 11421.
58. *Liu et al., 2007* – *Liu Q.Z., van Paradijs J., van den Heuvel E.P.J.* A catalogue of low-mass X-ray binaries in the Galaxy, LMC, and SMC (Fourth edition) // *Astronomy and Astrophysics.* – 2007. Vol. 469, no. 2 – P. 807.
59. *Lomb, 1976* — *Lomb N.R.* Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data // *Astrophysics and Space Science.* — 1976. — Vol. 39, no. 2 — P. 447-462
60. *Matsuoka et al., 2009* — *Matsuoka M., Kawasaki K., Ueno S. et al.* The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-Sky X-Ray Images // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* — 2009. — Vol. 61, no. 5 — P. 999.
61. *McHardy et al., 2006* – *McHardy I.M., Koerding E., Knigge C., Uttley P., Fender R.P.* Active galactic nuclei as scaled-up Galactic black holes // *Nature.* – 2006. – Vol. 444 – P. 730.
62. *Meyer & Meyer-Hofmeister, 2015* — *Meyer F., Meyer-Hofmeister E.* SU UMa stars: Rebrightenings after superoutburst // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* — 2015. — Vol. 67, no. 3 — id.52.

63. *Munari et al., 2012* — *Munari U., Bacci S., Baldinelli L. et al.* The ANS Collaboration Monitoring Program // *Baltic Astronomy*. — 2012. — Vol. 21 — P. 13-21.
64. *Munari et al., 2019* — *Munari U., Zampieri L., Ochner P., Manzini F.* Optical spectroscopy and photometry of MAXI J1820+070 (ASASSN-18ey) during the large multi-wavelength re-brightening of March 2019 // *The Astronomer's Telegram*. — 2019. — Vol. 12608.
65. *Munoz-Darias et al., 2019* — *Munoz-Darias T., Jimenez-Ibarra F., Panizo-Espinar G. et al.* Hard-state Accretion Disk Winds from Black Holes: The Revealing Case of MAXI J1820+070 // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2019. — Vol. 879, no. 1 — L4.
66. *Nakata et al., 2013* — *Nakata C., Ohshima T., Kato T.* WZ Sge-Type Dwarf Novae with Multiple Rebrightenings: MASTER OT J211258.65+242145.4 and MASTER OT J203749.39+552210.3 // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2013. — Vol. 65, no.6 — id. 117.
67. *Namekata et al., 2017* — *Namekata K., Isogai K., Kato T. et al.* Superoutburst of WZ Sge-type dwarf nova below the period minimum: ASASSN-15po // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2017. — Vol. 69, no. 1 — id. 2.
68. *Nijima et al., 2021* - *Nijima K., Kimura, M., Wakamatsu Y. et al.* Optical Variability Correlated with X-ray Spectral Transition in the Black-Hole Transient ASASSN-18ey = MAXI J1820+070 // *arXiv:2107.03681* — 2021.
69. *Negoro et al., 2018* — *Negoro H., Nakajima M., Sakamaki A.* MAXI/GSC detection of a rapid increase in the hard X-ray flux of MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram*. — 2018. — Vol. 12057.

70. *Ogilvie & Dubus, 2001* — *Ogilvie G. I., Dubus G.* Precessing warped accretion discs in X-ray binaries // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2001. — Vol. 320, no. 4 — P. 485-503.
71. *Osaki, 1989* — *Osaki Y.* A model for the superoutburst phenomenon of SU Ursae Majoris stars. // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* — 1989. — Vol. 41 — P. 1005-1033.
72. *Osaki, 2005* — *Osaki Y.* The disk instability model for dwarf nova outbursts // *Proceedings of the Japan Academy, Ser. B: Physical and Biological Sciences.* — 2005. — Vol. 81 — P. 291-305.
73. *Osaki & Meyer, 2002* — *Osaki Y., Meyer F.* Early humps in WZ Sge stars // *Astronomy and Astrophysics.* — 2002. — Vol. 383 — P. 574-579.
74. *Paice et al., 2018* — *Paice J.A., Gandhi P., Page K., Altamirano D., Court J., Charles P.* Correlated Optical/X-ray Timing Variations in MAXI J1820+070 found by Swift UVOT and XRT // *The Astronomer's Telegram.* — 2018. — Vol 11432.
75. *Patterson et al., 2018* — *Patterson J., Brincat S., Stone G. et al.* 17-Hour Period in V light from MAXI J1820+070 = ASASSN-18ey // *The Astronomer's Telegram.* — 2018. — Vol. 11756.
76. *Patterson et al., 2019* — *Patterson J., Epstein-Martin M., Kemp J. et al.* ASASSN-18ey (MAXI J1820+070): King of the Black-Hole Superhumps // 38th Annual Conference of the Society for Astronomical Sciences. The Symposium on Telescope Science. Joint Meeting with the Center for Backyard Astrophysics. — 2019. — P. 61.
77. *Remillard & McClintock, 2006* — *Remillard R.A., McClintock J.E.* X-Ray Properties of Black-Hole Binaries // *Annual Review of Astronomy & Astrophysics.* — 2006. — Vol. 44, no. 1 — P. 49

78. *Richmond, 2018 – Richmond M.* MAXI J1820+070 has optical period of 3.4 hours // *The Astronomer's Telegram*. – 2018. – Vol. 11723.
79. *Roques & Jourdain, 2019 – Roques J.-P., Jourdain E.* On the High-energy Emissions of Compact Objects Observed with INTEGRAL SPI: Event Selection Impact on Source Spectra and Scientific Results for the Bright Sources Crab Nebula, GS 2023+338 and MAXI J1820+070 // *The Astrophysical Journal*. – 2019. – Vol. 870 – P. 92
80. *Russel et al., 2019 – Russel D.M., Baglio M.C., Lewis F.* MAXI J1820+070 is close to quiescence // *The Astronomer's Telegram*. – 2019. – Vol. 12534.
81. *Sako et al., 2018 – Sako S., Ohsawa R., Ichiki M. et al.* Detection of 10-msec scale optical flares in the black-hole binary candidate MAXI J1820+070 (ASASSN-18ey) // *The Astronomer's Telegram*. – 2018. – Vol. 11426.
82. *Samus et al., 2017 — Samus N.N., Kazarovets E.V., Durlevich O.V., Kireeva N.N., Pastukhova E.N.* General catalogue of variable stars: Version GCVS 5.1 // *Astronomy Reports*. — 2017. — Vol. 61, no. 1 — P. 80-88.
83. *Scargle, 1982 — Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. // *Astrophysical Journal*. — 1982. — Vol. 263 — P. 835-853
84. *Shahbaz & Kuulkers, 1998 – Shahbaz T., Kuulkers E.* On the outburst amplitude of the soft X-ray transients // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1998. - Vol. 295, no. 1 – P. L1-L5.
85. *Shakura & Sunyaev, 1973 – Shakura N.I., Sunyaev R.A.* Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astronomy and Astrophysics*. – 1973. – Vol. 500 – P. 33.

86. *Shappee et al., 2014* — *Shappee, B. J., Prieto, J. L., Grupe, D., et al.* The Man behind the Curtain: X-Rays Drive the UV through NIR Variability in the 2013 Active Galactic Nucleus Outburst in NGC 2617 // *Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 788, no. 1 — P. 48.
87. *Shidatsu et al., 2018* — *Shidatsu M., Nakahira S., Yamada S. et al.* X-Ray, Optical, and Near-infrared Monitoring of the New X-Ray Transient MAXI J1820+070 in the Low/Hard State // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 868 — P. 54.
88. *Shidatsu et al., 2019* — *Shidatsu M., Nakahira S., Murata K.L. et al.* X-Ray and Optical Monitoring of State Transitions in MAXI J1820+070 // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Vol. 874 — P. 183.
89. *Smak, 2009* — *Smak, J.* New Interpretation of Superhumps // *Acta Astronomica*. — 2009. — Vol. 59, no 1 — p. 121-130.
90. *Tampo et al., 2021* — *Tampo Y., Isogai K., Kojiguchi N.* Spectroscopic and photometric observations of dwarf nova superoutbursts by the 3.8 m telescope Seimei and the Variable Star Network // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2021. — Vol. 73, no. 3 — P. 753-771.
91. *Tanaka & Shibazaki, 1996* — *Tanaka Y., Shibazaki N.* X-ray novae // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* — 1996. — Vol. 34 — P. 607-644.
92. *Tetarenko et al., 2021* — *Tetarenko A.J., Casella P., Miller-Jones J.C.A. et al.* Measuring fundamental jet properties with multiwavelength fast timing of the black hole X-ray binary MAXI J1820+070 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — Vol. 504 no. 3 — P. 3862-3883.
93. *Thomas & Wood, 2015* — *Thomas D.M., Wood M.A.* The Emergence of Negative Superhumps in Cataclysmic Variables: Smoothed Particle Hydrodynamics Simulations // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Vol. 803, no. 2 — id . 55.

94. *Thomas et al., 2019 – Thomas J.K., Buckley D.A.H., Kotze E., Potter S.* MAXI J1820+070: a new black hole low-mass X-ray binary candidate // *Memorie della Societa Astronomica Italiana.* – 2019. – Vol. 90 - P. 103.
95. *Thomas et. al, 2022 — Thomas J.K., Charles P. A., Buckley D.A.H. et al.* Large optical modulations during 2018 outburst of MAXI J1820 + 070 reveal evolution of warped accretion disc through X-ray state change // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2022 — Vol. 509, no. 1 — P. 1062-1074.
96. *Tomsick & Homan, 2019 – Tomsick J. A., Homan J.* NuSTAR and Swift observations of MAXI J1820+070 indicate further dimming in X-rays // *The Astronomer’s Telegram.* – 2019. – Vol. 12732.
97. *Torres et al., 2019 – Torres M.A.P., Casares J., Jiménez-Ibarra F. et al.* Dynamical Confirmation of a Black Hole in MAXI J1820+070 // *The Astrophysical Journal Letters.* – 2019. – Vol. 882, no. 2 – L21.
98. *Torres et al., 2020 – Torres M.A.P., Casares J., Jimenez-Ibarra F. et al.* The Binary Mass Ratio in the Black Hole Transient MAXI J1820+070 // *The Astrophysical Journal Letters.* – 2020. – Vol. 893, no. 2 – L37.
99. *Trushkin et al., 2018 – Trushkin S.A., Nizhelskij N.A., Tsybulev P.G., Erkenov A.* The 30-day monitoring of MAXI J1820+070 at 4.7 GHz // *The Astronomer’s Telegram.* – 2018. – Vol. 11539.
100. *Tucker et al., 2018 – Tucker M.A., Shappee B.J., Holoien T. W.-S. et al.* ASASSN-18ey: The Rise of a New Black Hole X-Ray Binary // *The Astrophysical Journal Letters.* – 2018. – Vol. 867 – L9.
101. *Ulowetz et al., 2019 – Ulowetz J., Myers G., Patterson J.* Rebrightening of ASASSN-18ey = MAXI J1820+070 // *The Astronomer’s Telegram.* – 2019. – Vol. 12567.

102. *Uttley et al., 2018 – Uttley P., Gendreau K., Markwardt C. et al.* NICER observations of MAXI J1820+070 suggest a rapidly-brightening black hole X-ray binary in the hard state // *The Astronomer's Telegram*. – 2018. – Vol. 11423.
103. *VanderPlas, 2018 — VanderPlas J.T.* Understanding the Lomb-Scargle Periodogram // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2018. — Vol. 236, no. 1 — id. 16
104. *Vozza et al., 2019 – Vozza D., Ali S., Balakrishan M. et al.* Continued Swift Monitoring of the Galactic Black-Hole Binary MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram*. – 2019. – Vol. 12688.
105. *Warner, 1995 — Warner B.* Cataclysmic variable stars // Cambridge University Press. — 1995.
106. *Whitehurst, 1988 — Whitehurst R.* Numerical simulations of accretion discs - I. Superhumps : a tidal phenomenon of accretion discs. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1988. — Vol. 232 — P. 35-51.
107. *Williams et al., 2019 – Williams D., Motta S., Bright J., et al.* AMI-LA and Swift confirm the multi-wavelength rebrightening of MAXI J1820+070 // *The Astronomer's Telegram*. – 2019. – Vol. 12577.
108. *Wood & Burke, 2007 — Wood M.A., Burke C.J.* The Physical Origin of Negative Superhumps in Cataclysmic Variables // *The Astrophysical Journal*. — 2007. — Vol. 661, no. 2 — P. 1042-1047.
109. *Wood et al., 2009 — Wood M. A., Thomas D.M., Simpson J.C.* SPH simulations of negative (nodal) superhumps: a parametric study // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2009 — Vol. 398, no. 4 — P. 2110-2121.

110. *Xu et al., 2019 – Xu Y., Harrison F., Tomsick J.* Rebrightening of MAXI J1820+070 (ASASSN-18ey) in X-rays // *The Astronomer's Telegram.* – 2019. – Vol. 13025.
111. *Zampieri et al., 2019 – Zampieri L., Munari U., Ochner P., Manzini F.* Dimming of MAXI J1820+070 (ASASSN-18ey) in the optical band // *The Astronomer's Telegram.* – 2019. – Vol. 12747.
112. *Zhao et al., 2021 — Zhao X., Gou L., Dong Y. et al.* Estimating the Black Hole Spin for the X-Ray Binary MAXI J1820+070 // *The Astrophysical Journal.* — 2021. — Vol. 916, no. 2 — P. 108.