

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Волков Игорь Михайлович

**Исследование затменных систем
с эллиптическими орбитами**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в отделе исследования Галактики и переменных звезд Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова

**Официальные
оппоненты**

Гранкин Константин Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики звезд Крымской астрофизической обсерватории РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории звездной эволюции Крымской астрофизической обсерватории РАН.

Малков Олег Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий отделом физики звездных систем Института астрономии РАН, профессор кафедры экспериментальной астрономии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Черепашук Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заведующий отделом звездной астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова, профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Защита диссертации состоится 03 октября 2024 года в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail (совет): dissovet@sai.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д.27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3055>

Автореферат разослан 25 июля 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Актуальность, история и степень разработанности темы исследования

История исследования затменных звезд насчитывает уже несколько столетий. Вероятно, о переменности звезды Алголя (β Персея), было известно с древних времен. Иначе сложно объяснить, почему эта визуально не слишком яркая звезда вызывала у арабов IX-X веков зловещие ассоциации с головой демона, а Птолемей ассоциировал ее с головой медузы Горгоны. Возможно также, что еще древние египтяне сумели верно определить период обращения этой затменной звезды, так как в древнеегипетском календаре, составленном 3200 лет тому назад, период счастливых и неудачных дней был определен в 2.85 дня, что удивительно точно совпадает с современным значением периода обращения в 2.86 суток. Затмения в тесной двойной системе были предложены в качестве одной из причин переменности английским любителем астрономии Джоном Гудриком (Goodricke, 1783). Гипотеза двойственности была подтверждена Фогелем (Vogel, 1889), когда в спектре Алголя было обнаружено периодическое смещение спектральных линий (Batten, 1989). Развитие в начале 20 века математических методов моделирования затмений произвело настоящую революцию в исследовании звезд (Russell, 1912). Стало впервые возможно с хорошей точностью измерить размеры звезд в относительных единицах. Если же удастся получить из спектральных наблюдений кривую лучевых скоростей, то становится возможным из третьего закона Кеплера измерить массы звезд-компонентов и прокалибровать размеры звезд в абсолютных единицах, например в радиусах Солнца. Тот факт, что в двойные затменные системы входят звезды практически всех известных типов делает метод универсальным. Например, именно исследование затменных систем с компонентом в виде звезды Вольфа-Райе (WR) позволило установить природу этих объектов в виде гелиевых остатков проэволюционировавших массивных звезд (Черепашук, 1975). А наблюдения за изменением периодов таких звезд позволило впервые измерить темп истечения вещества с поверхности этих горячих объектов (Халиуллин, 1974). Эволюция звезд в разделенных двойных системах до определенной степени не отличается от эволюции одиночных звезд. Таким образом, наблюдения затменных звезд дают нам мощный метод исследования всех типов звездного населения Галактики. В настоящее время в нашей Галактике насчитывается уже порядка 40тыс. затменных переменных звезд и число это постоянно растет. Каждый из этих объектов требует наблюдений. Хорошо исследовано на сегодняшний день удивительно малый процент общего количества. Связано это с трудоемкостью получения подробной кривой блеска. Нужны хорошие атмосферные условия, не всегда затмения приходятся на темное время суток. В связи с этим возникает разумное желание сделать наблюдения наиболее эффективными. В этом ключе особое внимание привлекают затменные звезды с эллиптическими орбитами. Теоретические расчеты показы-

вают, что по скорости прецессии орбитального эллипса можно установить параметры внутреннего строения звезд - распределение плотности вещества звезды по ее радиусу. Это является ценнейшим материалом для построения общей теории происхождения и эволюции звезд. Наблюдения таких объектов дает не только абсолютные характеристики обычные для наблюдений затменных звезд, но и позволяет заглянуть внутрь звезд различных спектральных классов, т.е. эффективность наблюдений подобных объектов гораздо выше, а затраты - те же. В пятидесятые года XX века из наблюдений относительно небольшого числа массивных двойных звезд ранних спектральных классов, периоды прецессии которых небольшие, выяснилось, что звезды являются гораздо более концентрированными объектами, чем считалось ранее. Плотность вещества в центре звезды на два порядка превышает среднее значение. Задача определения данного параметра для звезд других спектральных классов актуальна до сих пор, так как периоды прецессии звезд меньшей массы, более поздних спектральных классов, составляют десятки тысяч лет. По мере накопления наблюдательного материала стало понятно, что полного совпадения теории с наблюдениями нет. В общих чертах наблюдения не противоречат теории. Но остающийся разброс в 10-15% устранить пока не удастся. Кроме того, некоторые системы, такие как DI Гер, AS Сам, V541 Суг показывали на момент начала нашей работы значительное отклонение от теории. Таким образом, исследование затменных звезд с эллиптическими орбитами представляет большой и особый интерес для современной астрофизики

Цели и задачи исследования

В диссертационной работе были поставлены следующие цели:

- За счет включения в программу совершенно неисследованных звезд значительно увеличить количество затменных систем с эллиптическими орбитами для которых известны все физические параметры. В том числе определить межзвездное поглощение, размеры и температуры и из них на основании косвенного метода определить массы и эволюционный статус, получить данные о внутреннем строении звезд.
- Разрешить противоречия которые наблюдаются на протяжении десятков лет в ряде хорошо исследованных систем. Такими объектами являются три системы со значительно замедленным относительно теоретических предсказаний апсидальным вращением - DI Геркулеса, AS Жирафа, V541 Лебеда.
- Исследовать системы на наличие невидимых спутников. Построить орбиты и определить физические параметры спутников.

Для достижения этих целей были решены следующие задачи:

- Создана необходимая фотометрическая аппаратура для наблюдений в системе *UBVRIRcIc* Джонсона-Казинса.
- Проведены исследования всех применявшихся фотометров с целью установить уравнения перехода из инструментальных систем в стандартную. По ходу работы калибровки повторялись чем поддерживалась стабильность и однородность получаемых наблюдений. Исследованы линейность и температурные зависимости аппаратуры.
- Созданы специальные программы обработки наблюдений для учета влияния земной атмосферы на измерения, учитывающие селективность земной атмосферы.
- Проведен выбор объектов перспективных для исследования внутреннего строения звезд и определения их интегральных характеристик, всего 124 объекта.
- Создан алгоритм обработки наблюдений и создан пакет программ реализующий разработанный метод.
- Проведены фотометрические наблюдения звезд списка, 1592 наблюдательные ночи, около 1 млн индивидуальных измерений. Для ряда звезд получены спектральные наблюдения по заказу автора на сторонних обсерваториях.
- В соответствии с принятым алгоритмом обработаны данные по 61 объекту и составлены однородные массивы наблюдений во всех фотометрических полосах.
- Для каждого из 61 объекта получены решения кривых блеска, относительно-абсолютные звездные величины и определены физические характеристики. Проведен поиск невидимых тел. Установлен эволюционный статус.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются двойные звезды, их физические характеристики, теория эволюции.

Предметом исследования являются:

- (1) Тесные двойные системы, состоящие из звезд различных спектральных классов, от *B* до *K*.
- (2) Внутреннее строение звезд на примере разделенных двойных систем, не оказывающих влияния на эволюцию каждого из компонентов в отдельности.
- (3) Кратность выбранных затменных двойных звезд.

(4) Физическая переменность отдельных компонентов затменных двойных систем.

Методология исследования

Самостоятельные фотометрические наблюдения в полосах $UBVRIRcIc$ как на разработанных автором приборах, так и с привлечением штатного оборудования различных обсерваторий.

Расшифровка и решение кривых блеска с помощью самостоятельно разработанных программ.

Спектральные наблюдения по заказу автора на сторонних обсерваториях.

Обработка спектральных наблюдений с помощью самостоятельно разработанных программ до конечного результата - определение масс избранных объектов.

Продолжительные (десятки лет) наблюдения объектов списка для определения скорости апсидального вращения и на этой основе констант концентрации к центру звезд.

Привлечение появившихся в свободном доступе высокоточных спутниковых наблюдений для решения кривых блеска и уточнения параметров звезд.

Использование для небольшого числа объектов имеющихся в литературе фотометрических и спектральных данных. Обработка их по единой с остальными наблюдениями методике.

Положения, выносимые на защиту

1. Фотометрическая точность, достигнутая для 100 тыс. измерений блеска 61 объекта в системе $UBVRIRcIc$, составляет в среднем ± 0.01 звездных величин и лучше, кроме ультрафиолетовой фотометрической полосы U , где точность составляет $\pm(0.02 - 0.04)$ звездных величин.
2. Абсолютные физические характеристики шестидесяти одной исследованной в данной работе звезды, такие как размеры, массы, температуры соответствуют точности, необходимой для проверок выводов теории эволюции звезд.
3. Причиной замедленного вращения линии апсид в системе α Северной Короны является несовпадение направлений орбитального и осевого вращательного момента главного компонента.
4. В системах V490 Щита, V645 Возничего, EQ Волопаса, V1103 Кассиопеи, V957 Цефея отсутствует синхронизация между орбитальными и вращательными моментами.

5. Орбитальный и осевой моменты в системе AS Жирафа синхронизированы и удовлетворяют теоретическим предсказаниям. Скорость апсидального движения AS Жирафа соответствует теоретическому значению:
 $\dot{\omega}_{obs} = 0.38^\circ \pm 0.02^\circ/\text{год}$, $\dot{\omega}_{theor} = 0.44^\circ \pm 0.01^\circ/\text{год}$.
6. В открытой автором диссертации четверной двузатменной системе BU Малого Пса существуют нутация и резонансы. Нутация происходит с периодом около 2 месяцев и амплитудой в 1 минуту, отнесенной к поправкам в точные моменты минимумов.
 Отношение орбитальных периодов двух затменных пар PA/PB = 0.9, периоды нутации обеих систем равны, апсидальные периоды двух систем равны и в четыре раза превышают период обращения двух двойных звезд вокруг центра масс кратной системы, эксцентриситеты орбит обеих двойных звезд также равны.
7. Период пульсаций типа δ Щита в компонентах затменных систем V577 Змееносца и V961 Цефея составляет 0.06949088 и 0.04826044 суток соответственно. Точность измерения этих величин лучше 0.002 секунд. Данные периоды стабильны на протяжении 36.5 лет и 13 лет соответственно.
8. Избыточное межзвездное поглощение для систем V2544 Лебедя и V839 Цефея составляет 2.95 ± 0.05 и 1.45 ± 0.05 звездных величин соответственно.
9. Скорость апсидального движения V541 Лебедя соответствует теоретической: $\dot{\omega}_{obs} = 0.0085^\circ \pm 0.0002^\circ/\text{год}$, $\dot{\omega}_{theor} = 0.00844^\circ \pm 0.00007^\circ/\text{год}$.

Научная новизна

В работе впервые:

- * Была детально исследована 61 недавно открытая или плохо изученная затменная система с эллиптическими орбитами.
- * В 28 системах было впервые открыто и измерено с хорошей точностью апсидальное движение, что дало ценную информацию о внутреннем строении звезд.
- * В ходе наблюдений была разработана единая методика фотометрических наблюдений и их обработки применительно к исследованию затменных звезд.
- * Был открыт и подробно исследован ряд систем с пульсирующими компонентами типа δ Цефея и β Цефея.

- * Были вскрыты причины наблюдавшихся до сего времени расхождений наблюдений и теоретических расчетов в апсидальном движении V541 Лебедя и AS Жирафа.
- * У ряда наблюдавшихся звезд на основе предложенных автором косвенных признаков открыты невидимые спутники, определены их физические характеристики и параметры орбиты.
- * Обнаружены и подробно исследованы двузатменные системы, состоящие из двух затменных систем с эллиптическими или круговыми орбитами, BU Малого Пса и V839 Цефея. Открытие оказалось пионерским и совпало по времени с зарубежными подобными работами.
- * Выявлены системы с отсутствием синхронизации между орбитальным и вращательными моментами в большом количестве затменных систем с эллиптическими орбитами, что является важнейшим фактором для определения констант внутреннего строения звезд.

Теоретическая и практическая значимость работы

определяется тем, что примерно для половины звезд выбранных для наблюдений построены высокоточные многоцветные кривые блеска, из которых уже получены относительные и абсолютные параметры звезд, определен их возраст и, в ряде случаев, химический состав. Впервые определена скорость апсидального движения для трети исследованных звезд. Из исследования апсидального вращения столь значительного количества объектов удалось выделить системы, состоящие из звезд - близнецов, в которых есть возможность реально определить константы концентрации вещества к центру звезды. Эти константы не могут быть определены из наблюдений для каждого из компонентов по отдельности, так как входят в уравнение Радо симметрично. Но если компоненты идентичны, то и константы концентрации должны быть одинаковыми и уравнение Радо разрешается относительно одной неизвестной величины. Удалось найти несколько систем с очень близкими по своим параметрам компонентами. Теория в пределах точности наблюдений подтверждается.

Полученные автором первичные эпохи моментов минимумов послужат в дальнейшем как опорные вехи для более точного исследования апсидального движения, а значит и внутреннего строения звезд.

Также в ближайших окрестностях ряда исследуемых звезд были открыты новые короткопериодические переменные звезды. Звезды PS Большой Медведицы, V880 Цефея, V434 Гидры имеют в 3-6 угловых минутах новые затменные

системы типа W Большой Медведицы с периодами 0.4011571 0.26644 0.2672351 суток соответственно. Проверка наших наблюдений с помощью фотометрических каталогов ROTSE и ASAS позволила полностью подтвердить и уточнить найденные нами периоды. Три других исследуемых системы имеют в окрестностях 3-7' уже известные затменные звезды типа W Большой Медведицы, V490 Щита, GG Ориона, V921 Цефея. Этот факт, а также открытая нами система BU Малого Пса, наталкивают на мысль поискать физическую связь исследуемых систем со вновь открытыми. Возможно, мы наблюдаем сверхширокие четверные пары или же у вскрытых парных систем имеется общность происхождения.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов была проверена следующим образом:

1. Применение использованного метода наблюдений и обработки к нескольким хорошо изученным спектральным и фотометрическим методам системам позволило сравнить данные определяемые по нашей методике с хорошо измеренными другими способами. Это сравнение помогло, также, определить реальные ошибки косвенного метода.
2. Некоторые параметры, получаемые из решений кривых блеска, могут быть получены другими способами. В частности, проведенное сравнение фотометрических параллаксов в пределах ошибок совпало с тригонометрическими параллаксами GAIA. В некоторых случаях наше значение оказалось более точным, чем данные GAIA. Более того, опубликованные данные GAIA DR3 для некоторых объектов приблизились к нашим фотометрическим значениям. В то же время, для части объектов обнаружено значительное расхождение. В ряде случаев это связано с оптической двойственностью объекта, что принципиально ухудшает точность GAIA.
3. Полученные из многоцветной фотометрии значения межзвездного поглощения сравнивались с данными обзоров. В основном противоречий не обнаружено, за исключением того, что некоторые системы показали значительные избытки поглощения. Общим для систем, продемонстрировавших аномалии, является их небольшой возраст и ранний спектральный класс. Возможно, мы наблюдаем остатки протозвездных пылевых облаков.
4. Определяемые из фотометрии спектральные классы звезд наблюдательного списка сравнивались с полученными из спектральных наблюдений. Получено хорошее согласие результатов. В ряде случаев спектры, определяемые

из многоцветной фотометрии, лучше соответствуют температурным калибровкам чем те, что были определены непосредственно из спектральных наблюдений, например, V541 Лебедя.

5. Для всех наблюдавшихся звезд были построены всевозможные диаграммы, такие как масса-светимость, ускорение свободного падения - температура, радиус - масса и пр. Противоречий с такими же диаграммами, но полученными из спектральных наблюдений, не обнаружено.
6. Ряд затменных систем, у которых было предположено наличие третьего тела, получили подтверждение из независимых спектральных наблюдений сторонних наблюдателей: V577 Змееносца, BD -20 4369.
7. Заявленная высокая точность наблюдений подтверждается также тем, что в ряде систем были обнаружены малоамплитудные, на уровне процентов и даже долей процентов, пульсации компонентов: V577 Змееносца, V961 Цефея - типа δ Щита; V957 Цефея, V839 Цефея - типа β Цефея.

Апробация

Результаты данной диссертационной работы неоднократно докладывались автором на астрофизических семинарах ИНАСАН, ГАИШ МГУ, а также на следующих международных конференциях:

1. The Unique Binary Star α Coronae Borealis. Автор: Volkov I.M. Zdenek Kopal's Binary Star Legacy., Litomyšl, Chechia, Чехия, 31 марта 15 - 3 апреля 2004. (*Устный доклад*)
2. Search for a Third Body in the DI Her System by means of the Light- Time Effect in O-C. Автор: Volkov I.M. The Light-Time Effect in Astrophysics, Brussels, Belgium, Бельгия, 19-22 июля 2004 (*Устный доклад*)
3. Apsidal motion in high eccentric binary V541 Cyg (Устный) Авторы: Volkov I.M., Volkova N.S. Dmitry Yakovlevich Martynov (1906-1989) Close binary stars in modern astrophysics, Sternberg Astronomical Institute, Moscow Lomonosov University, Moscow, Russia, Россия, 2006. (*Устный доклад*)
4. The Unique Triple System V577 Oph. 20 years of observations. Авторы: Volkova N., Volkov I. Binaries - Key to Comprehension of the Universe, Brno, Chechia, Чехия, 2009. (*Устный доклад*)
5. Is EQ Boo a quadruple system? Авторы: Volkov Igor M., Nikolenko Igor V., Volkova Natalia S., Drahomir Chochol IAU Symposium No. 282: "From Interacting

Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools, Astronomical Institute of the Slovak Academy of Sciences, Tatranska Lomnica, Slovakia, Словакия, 2011. *(Устный доклад)*

6. Apsidal motion in BW Aqr. Авторы: Chochol D., Volkov I.M. Observational techniques, instrumentation and science for meter-class telescopes, Tatranska Lomnica, Slovakia, Словакия, 2013. *(Стенодовый доклад)*
7. Observational manifestations of changes in the orbits of some triple systems Автор: Volkov I.M. Living Together: Planets, Host Stars and Binaries, Litomysl, Czech Republic, September 8 - 12, 2014., Litomysl, Czech Republic, Чехия, 2014. *(Устный доклад)*
8. Fast apsidal motion in GSC 4292 0745. Авторы: Volkov I.M., Chochol D., Bagaev L.A. Living Together: Planets, Host Stars and Binaries, Litomysl, Czech Republic, September 8 - 12, 2014., Litomysl, Czech Republic, Чехия. *(Стенодовый доклад)*
9. Southern Algol-type binaries RW CrA and DX Vel as multiple systems. Авторы: Chochol D., Volkov I., Grygar J., Masek M. The IMPACT of BINARIES on STELLAR EVOLUTION, ESO Garching, July 3 - 7, 2017., Гархинг, Германия, 3-7 июля 2017. *(Устный доклад)*
10. GSC 3152-1202 - massive eccentric eclipsing binary with a fast apsidal motion Авторы: Volkov I., Bagaev L., Chochol D. The IMPACT of BINARIES on STELLAR EVOLUTION, ESO Garching, July 3 - 7, 2017., Гархинг, Германия, 3-7 июля 2017. *(Устный доклад)*
11. V839 Cep - a new massive eclipsing variable with apsidal motion in the field of Trumpler 37. Авторы: Volkov I.M., Chochol D., Kravtsova A.S., Bagaev L.A. Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes II, Tatranska Lomnica, Словакия, 24-28 сентября 2018. *(Стенодовый доклад)*
12. Search for invisible satellites in binary eclipse systems using photometric methods Автор: Volkov I.M. Universe of Binaries, Binaries in the Universe, Телч, Чехия, 6-11 сентября 2019. *(Устный доклад)*
13. New orbit of spectral and eclipsing double star BD-20 4369. Авторы: Volkov I.M., Pribulla T., Kravtsova A.S. Universe of Binaries, Binaries in the Universe, Телч, Чехия, 6-11 сентября 2019. *(Стенодовый доклад)*
14. Apsidal motion in Alpha CrB. Автор: Volkov I.M. Universe of Binaries, Binaries in the Universe, Телч, Чехия, 6-11 сентября 2019. *(Стенодовый доклад)*
15. Search for invisible bodies in eclipsing elliptical systems. Авторы: Volkov I.M., Kravtsova A.S., Chochol D. Kolos conference. The international meeting about

variable stars research, Hotel Kamei in Snina, Словакия, 26-28 октября 2022.
(Устный доклад)

16. Apsidal motion in AS Cam, no discrepancy with theory. Автор: Volkov I.M. Kolos conference. The international meeting about variable stars research, Hotel Kamei in Snina, Словакия, 26-28 октября. (Устный доклад)

Личный вклад автора диссертации

Автором были разработаны и изготовлены фотоэлектрический и ПЗС- фотометры, на которых было получено примерно 80% всех наблюдений. Остальные наблюдения получены с использованием стандартной приемной аппаратуры на различных обсерваториях: телескоп Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН с ПЗС-матрицей FLI; телескопы обсерватории в Старой Лесне, Словакия, с ПЗС-матрицей ST-10XME, а также двухканальным электрофотометром на базе фотоумножителя R 2949S производства фирмы Хамамацу. Также на обсерватории в Старой Лесне автором в течение сезона наблюдений 2012 года был использован UBVRIRc – фотометр собственного изготовления на базе ПЗС- матрицы VersArray 512UV.

Все фотометрические наблюдения были проведены лично автором. Небольшое количество спектральных наблюдений было получено по заказу автора на обсерватории Скальнате Плесо (Словацкая академия наук), телескоп D=1.35м оборудованный спектрографом высокого разрешения, R=35000.

Обработка наблюдений также была проведена лично автором с помощью программ, написанным им на языке Паскаль. Ряд систем, кривые блеска которых показывают эффекты близости, был обработан с помощью алгоритма Вильсона-Девинея, реализованного в пакете Phoebe. В работах из списка публикаций по теме диссертации автор сделал следующий вклад:

В работах из списка публикаций по теме диссертации автор сделал следующий вклад:

- 11 работ опубликованы без соавторов (статьи 1, 2, 4, 5, 10, 11, 26, 29, 33, 35, 36). Все представленные в них результаты получены лично автором.
- В статьях 3, 6, 7, 8, 12, 13, 18, 19, 20, 22, 23, 25, 27, 28, 30, 31, 32, 34 где автор стоит первым, его вклад был определяющим, от 80 до 90 процентов всей работы.
- В работах 14, 15 вклад автора 60 процентов всей работы.
- В работе 9 автору принадлежит доказательство кратности двойной затменной системы и получен фотометрический наблюдательный материал, личный вклад автора 80 процентов.

- В работах 16, 21, 37 вклад автора составляет 60 процентов.
- В работе 17 автор на основании предоставленного наблюдательного материала решил методом Вильсона-Девинья кривые блеска всех трех затменных звезд, определил точные показатели цвета из которых на основании предложенного автором метода выявления кратных систем была предположена кратность двух из трех систем. Автором по своему методу были определены точные моменты минимумов и построены диаграммы $O - C$ для этих систем, которые гипотезу кратности подтвердили. Также автор произвел расчет температур, масс и размеров невидимых тел, поэтому, хотя использованы чужие наблюдения, вклад автора составляет 80%.
- В работе 24 вклад автора 25 процентов.

Краткое содержание, структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, 7 глав и Заключения. Общий объем диссертации составляет около 239 страниц, содержит 55 рисунков и 26 таблиц. Список литературы включает 164 наименования.

Во **Введении** обоснована актуальность работы, обозначены предметы и объекты, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов. Также **Введение** содержит список тезисов, выносимых на защиту, список работ, в которых автором диссертации опубликованы защищаемые положения, список конференций, на которых автор представил устные или стендовые доклады по теме диссертации, а также описывает научную новизну, практическую ценность полученных результатов и личный вклад автора в работу по получению этих результатов.

В **Главе 1** рассмотрена история исследований затменных звезд. Обозначено современное состояние данного направления исследований, выделены наиболее интересные результаты полученные в предыдущие годы и нерешенные проблемы.

Глава 2 посвящена методу исследования поставленных проблем. Раздел 2.1 посвящен важному вопросу калибровки наблюдений. Широкополосная фотометрия при правильном использовании становится мощным инструментом. Здесь очень важно измеренные в инструментальной системе величины корректно переводить в стандартную UVV систему Джонсона. Так что кроме непосредственно измерения интересующих звезд много сил и времени было потрачено на исследование аппаратуры и ее калибровки.

В разделе 2.2 рассказано о наблюдениях в высокогорной обсерватории на Тянь-Шане, где были начата работа по программе наблюдений затменных пере-

менных. Огромный плюс этих наблюдений - стабильная атмосферная прозрачность. Однако после 1991 года эта обсерватория оказалась недоступна.

Раздел 2.3 показывает разработку своего фотометра и его использование на других обсерваториях в России. Показаны калибровочные графики, исследована линейность ФЭУ.

В разделе 2.4 описаны используемые ПЗС матрицы в качестве приемной аппаратуры, и калибровочные коэффициенты. В качестве звездных стандартов для калибровок берутся WBVR каталог ГАИШ (Корнилов и др., 1991), экваториальные стандарты (Landolt, 1983, 2009), каталог (Mermilliod, 1997), а также величины звезд скопления М67, например работы (Johnson, Sandage, 1955) и (Moffett, Barnes, 1979).

В **Главе 3** представлен математический аппарат использованный в данном исследовании. В разделе 3.1 представлено теоретическое обоснование поворота линии апсид в пространстве, скорость этого поворота определяется отклонением формы звезды от идеальной сферы. Рассел первым описал этот эффект, так называемый классический вклад в апсидальное вращение (Russell, 1928). Есть еще и релятивистский вклад, связанный с искажением пространства-времени вблизи массивных тел (Levi-Civita, 1937). В разделе 3.2 приведена основная формула для расчета апсидального движения из наблюдений. Раздел 3.3 представляет формулы для расчета орбиты третьего тела. Раздел 3.4 посвящен исследованию точности косвенного метода определения абсолютных характеристик звезд. Детально его описание можно прочитать например в работе (Volkov, 2017). В диссертации проводится сравнение измерения масс звезд косвенным методом и определенных по кривым лучевых скоростей, для чего был взят каталог (Eker et al., 2014). Надо отметить, что для такого исследования необходимы и температурные калибровки, используются работы (Flower, 1996) и (Popper, 1980).

В **Главе 4** представлены полученные в работе физические характеристики исследованных звезд. Обсуждаются различные типы объектов:

- Системы, пригодные для исследования внутреннего строения звезд. К таким относятся системы, состоящие из двух идентичных компонентов с удачной ориентацией орбиты.
- Системы с преобладающим релятивистским вкладом в апсидальное вращение.
- Системы с орбитой имеющей значительный эксцентриситет. Наивысшее значение эксцентриситета из исследуемых затменных имеет система V680 Mon ($e=0.614$).
- Системы с пульсирующими компонентами типа δ Щита. Пульсации изменяют форму кривой блеска, разработан алгоритм для построения моделей таких звезд.

- Системы с физически переменными компонентами типа β Цефея.
- Тройные и четверные системы. Доказательством наличия в системе невидимого компонента, физически связанного с ней, является световой эффект в ходе остатков уклонений моментов минимумов О-С (Volkov, 2020). Конечно, наличие третьего тела можно подтвердить по изменению гамма-скорости, измеренной по спектрам, однако это требует гораздо больших затрат на приемную аппаратуру и большую входную апертуру. Фотометрическим методом мы обнаружили наличие невидимого спутника в 8 системах.
- Возможные связанные четверные системы. Семь объектов из нашего списка, возможно, представляют собой сверхширокие визуально-двойные пары. Точно сказать можно будет по мере накопления и улучшения точности измерений.
- Системы с избыточным межзвездным поглощением. Многоцветная фотометрия позволяет независимо оценить величину межзвездного поглощения и сравнить с данными обзоров в нужном направлении (Green et al., 2015), или (Schlafly, Finkbeiner, 2011). 4 системы из изученных показывают реальное поглощение, превышающее в несколько раз данные обзоров. Возможно, эти системы погружены в остатки протозвездных облаков.
- Системы с быстрым апсидальным вращением.
- Конфликтные системы - системы с принципиальным противоречием, которое удалось разрешить.

В **Главе 5** решена проблема замедленного апсидального вращения системы AS Жирафа.

Глава 6 посвящена многолетнему фотометрическому исследованию системы α Северной Короны. Доказывается полученное ранее замедленное апсидальное вращение и приводится доказательство ускоренного несинхронного вращения главного компонента наклоненного к плоскости орбиты. Система является первой, в которой реализована гипотеза Н.И.Шакуры о замедлении апсидального вращения при наклонном вращении компонентов.

Глава 7 посвящена открытию и исследованию автором яркой четверной двузатменной системы ВU Малого Пса. Приводятся полученные из собственной фотометрии и спектральных наблюдений точные физические характеристики всех компонентов, элементы взаимной орбиты, периоды апсидального вращения каждой из затменных систем, найденные синхронизации в системе. Впервые обнаружена нутация в затменных двойных.

Заключение посвящено краткому обзору итогов проведенной работы и выводов для будущих исследований.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 37 печатных изданиях, 27 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности.

Публикации в журналах Web of Science/Scopus/RSCI:

1. Volkov I., Unexplored Eclipsing Stars with Elliptical Orbits, *Peremennye Zvezdy (Variable Stars)*, 2024, 44, No. 4. Scopus SJR2023=0.12. Личный вклад 100%. Объем 0.96 печатных листа.
2. Волков И.М., Новое значение скорости апсидального вращения и физические параметры тройной затменной системы AS Cam, *Астрономический журнал*, 2023, т. 100, No. 4, с. 319-335. Переводная версия: *Astronomy Reports*, 2023, vol. 67, No. 4, pp. 320-335. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 100%. Объем 1.92 печатных листа
3. Volkov Igor M., Kravtsova Alexandra S., Apical Motion and Physical Parameters in the Eclipsing System V490 Sct, *Astronomical Journal*, 2022, vol. 164, No. 194, pp. 1-7. Web of Science JIF2023=5.1. Личный вклад 80%. Объем 0.84 печатных листа
4. Volkov Igor, Third Body in GSC 3937 2349, a New W UMa Variable, *Peremennye zvezdy (Variable stars)*, 2022, vol. 42, No. 6, с. 35-37. Scopus SJR2023=0.12. Личный вклад 100%. Объем 0.36 печатных листа
5. Volkov I.M., V961 Cep: A New Eclipsing Variable with a delta Sct Component, *Peremennye zvezdy (Variable stars)*, 2022, т. 42, No. 1, с. 1-7. Scopus SJR2022=0.12. Личный вклад 100%. Объем 0.84 печатных листа
6. Волков И.М., Кравцова А.С., Быстрое апсидальное вращение и физические параметры V1103 CAS, *Астрономический журнал*, 2022, т. 99, No. 6, с. 470-485. Переводная версия: *Astronomy Reports*, 2023, vol. 66, No. 6, pp. 466-480. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 90%. Объем 1.92 печатных листа
7. Волков И.М., Кравцова А.С., Хохол Д., Физические параметры V680 Mon - затменной звезды с наивысшим известным эксцентриситетом, *Астрономический журнал*, 2021, т. 98, No. 3, с. 212-231. Переводная версия: *Astronomy Reports*, 2021, vol. 65, No. 3, pp. 184-202. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 80%. Объем 2.4 печатных листа
8. Волков И.М., Кравцова А.С., Хохол Д., Четверная двузатменная система BU CMi, *Астрономический журнал*, 2021, т. 98, No. 9, с. 115-128. Переводная

версия: *Astronomy Reports*, 2021, vol. 65, No. 9, pp. 826-838. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 80%. Объем 1.68 печатных листа

9. Kravtsova A.S., Volkov I.M., Pribulla T., A new spectroscopic and eclipsing binary BD-20 4369, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 2020, vol. 50, pp. 615-617. Web of Science JIF2023=0.4. Личный вклад 80%. Объем 0.36 печатных листа
10. Volkov I.M., Apsidal motion in alpha CrB, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 2020, vol. 50, pp. 635-636. Web of Science JIF2023=0.4. Личный вклад 100%. Объем 0.24 печатных листа
11. Volkov I.M., Search for invisible satellites in eclipsing binary systems using photometric methods, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 2020, vol. 50, pp. 601-606. Web of Science JIF2023=0.4. Личный вклад 100%. Объем 0.72 печатных листа
12. Волков И.М., Кравцова А.С., Затменная система PS UMA: эволюционный статус и физические параметры компонентов, *Астрономический журнал*, 2020, т. 97, No. 3, с. 190-205. Переводная версия: *Astronomy Reports*, 2020, vol. 64, No. 3, pp. 211-225. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 80%. Объем 1.92 печатных листа
13. Volkov I.M., Bagaev L.A., Kravtsova A.S., Chochol D., V839 Cep - a new massive eclipsing variable with apsidal motion in the field of Trumpler 37, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 2019, vol. 49, pp. 434-438. Web of Science JIF2023=0.4. Личный вклад 80%. Объем 0.6 печатных листа
14. Кравцова А.С., Волков И.М., Хохол Д., Физические параметры затменной системы V2647 Cyg, *Астрономический журнал*, 2019, т. 96, No. 6, с. 508-522. Переводная версия: *Astronomy Reports*, 2019, vol. 63, No. 6, pp. 495-507. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 60%. Объем 1.8 печатных листа
15. Burlak M.A., Volkov I.M., Ikonnikova N.P., Absolute parameters and period variation in a semidetached eclipsing variable V2247 Cyg, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 2018, vol. 48, No. 4, pp. 536-553. Web of Science JIF2023=0.4. Личный вклад 60%. Объем 2.16 печатных листа
16. Багаев Л.А., Волков И.М., Николенко И.В., Физические параметры затменной системы V1176 Cas, *Астрономический журнал*, 2018, т. 95, No. 10, с. 702-715. Переводная версия: *Astronomy Reports*, 2018, vol. 62, No. 10, pp. 664-676. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 60%. Объем 1.68 печатных листа

17. Volkov I.M., Chochol D., Grygar J., Masek M., Jurysek J., Orbital period changes in RW CrA, DX Vel and V0646 Cen, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 2017, vol. 47, No. 1, pp. 29-52. Web of Science JIF2023=0.4. Личный вклад 80%. Объем 2.88 печатных листа
18. Волков И.М., Хохол Д., Кравцова А.С., Физические параметры затменной системы V798 Ser, Астрономический журнал, 2017, т. 94, No. 5, с. 436-446. Переводная версия: Astronomy Reports, 2017, vol. 61, No. 5, pp. 440-449. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 85%. Объем 1.32 печатных листа
19. Volkov I.M., Chochol D., Apsidal motion in BW Aqr, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 2014, vol. 43, No. 3, pp. 419-421. Web of Science JIF2023=0.4. Личный вклад 90%. Объем 0.36 печатных листа
20. Volkov I.M., Chochol D., Grygar J., Jelinek M., Kubanek P., Masek M., Prouza M., Ribeiro T., Sebastian D., Van Houten C.J., Period changes in the eclipsing binary DX Vel, Information Bulletin on Variable Stars, 2013, No. 6066, pp. 1-5. Scopus SJR2022=0.128. Личный вклад 70%. Объем 0.6 печатных листа
21. Volkova N., Volkov I., V974 Cyg - A Triple System with Apsidal Motion, Information Bulletin on Variable Stars, 2011, No. 5976, pp. 1-4. Scopus SJR2022 = 0.128 (выпуск и индексирование прекращены). Личный вклад 90%. Объем 0.48 печатных листа
22. Волков И.М., Волкова Н.С., Николенко И.В., Хохол Д., Проблема кратности и апсидального вращения в затменной переменной EQ Boo, Астрономический журнал, 2011, т. 88, No. 9, с. 894-911. Переводная версия: Astronomy Reports, 2011, vol. 55, No. 9, pp. 824-840. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 85%. Объем 2.04 печатных листа
23. Волков И.М., Волкова Н.С., Хохол Д., Физические параметры и орбита затменной двойной системы BD +66 1663 = GSC 4479 412, Астрономический журнал, 2010, т. 87, No. 5, с. 462-477. Переводная версия: Astronomy Reports, 2010, vol. 54, No. 5, pp. 418-432. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 90%. Объем 1.92 печатных листа
24. Wilson R.E., Chochol D., Komzik R., Van Hamme W., Pribulla T., Volkov I., Ellipsoidal Variable V1197 Orionis: Absolute Light-Velocity Analysis for Known Distance, Astrophysical Journal, 2009, vol. 702, No. 1, pp. 403-413. Web of Science JIF2023=4.8. Личный вклад 25%. Объем 1.32 печатных листа
25. Волков И.М., Волкова Н.С., Физические параметры и орбита затменной двойной системы GSC 4596 1254 = SAO 3282, Астрономический журнал, 2009, т. 86, No. 2, с. 158-169. Переводная версия: Astronomy Reports, 2009, vol. 53, No. 2, pp. 136-147. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 90%. Объем 1.44 печатных листа

26. Volkov, Igor M., The Unique Binary Star α Coronae Borealis, *Astrophysics and Space Science*, 2005, т. 296, No. 1-4, pp. 105-108. Web of Science JIF2023=1.8. Личный вклад 100%. Объем 0.48 печатных листа
27. Волков И.М., Халиуллин Х.Ф., Вращение линии апсид в затменной двойной системе GG Ориона, *Астрономический журнал*, 2002, т. 79, No. 9, с. 1-14. Переводная версия: *Astronomy Reports*, 2002, vol. 46, No. 9, pp. 747-759. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 90%. Объем 1.68 печатных листа

Иные публикации:

28. Volkov I.M., Bagaev L.A., Chochol D., Fast Apsidal Motion in GSC4292-0745, в сборнике *Living Together: Planets, Host Stars, and Binaries*, ASP Conference Series, 2015, vol. 496, pp. 266-268. Личный вклад 80%. Объем 0.36 печатных листа
29. Volkov I.M., Observational Manifestations of Changes in the Orbits of Some Triple Systems, в сборнике *Living Together: Planets, Host Stars, and Binaries*, ASP Conference Series, 2015, vol. 496, pp. 109-111. Личный вклад 100%. Объем 0.36 печатных листа
30. Volkov Igor M., Chochol Drahomir, Volkova Natalia S., Nikolenko Igor V., Is EQ Boo a Quadruple System? в сборнике *From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools*, Proceedings of the IAU Symposium, 2012, Cambridge, UK, vol. 282, pp. 89-90. Личный вклад 80%. Объем 0.24 печатных листа
31. Volkov I.M., Volkova N.S., The Unique Triple System V577 Oph. 20 Years of Observations, в сборнике *Binaries - Key to Comprehension of the Universe*, ASP Conference Series, 2010, vol. 435, pp. 323-326. Личный вклад 90%. Объем 0.48 печатных листа
32. Volkov I.M., Volkova N.S., Photometry of the highly eccentric binary V541 Cyg, *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 2007, Cambridge Scientific Publishers, vol. 26, No. 1, pp. 129-132. Личный вклад 90%. Объем 0.48 печатных листа
33. Volkov I.M., Search for a Third Body in the DI Her System by means of the Light-Time Effect in O-C, ASP Conference Series, 2005, vol. 335, pp. 351-354. Личный вклад 100%. Объем 0.48 печатных листа
34. Volkov I.M., Khaliullin Kh. F., The Revision of Apsidal Motion in V541 Cyg: no discrepancy with theory, *Information Bulletin on Variable Stars*, 1999, издательство Konkoly Observatory (Hungary), No. 4680, pp. 1-4. Личный вклад 90%. Объем 0.48 печатных листа

35. Volkov I.M., The Discovery of Apsidal Motion in the Binary System alpha CrB, Information Bulletin on Variable Stars, 1993, издательство Konkoly Observatory (Hungary), No. 3876, pp. 1-2. Личный вклад 100%. Объем 0.24 печатных листа
36. Volkov I., V577 Oph - an Eclipsing Binary with a delta Sct Type Primary Component, Information Bulletin on Variable Stars, 1990, издательство Konkoly Observatory (Hungary), No. 3493, pp. 1-4. Личный вклад 100%. Объем 0.48 печатных листа
37. Khodykin S.A., Volkov I.M., WBVR Photometry of DI Herculis, Information Bulletin on Variable Stars, 1989, издательство Konkoly Observatory (Hungary), No. 3293, pp. 1-3. Личный вклад 60%. Объем 0.36 печатных листа

Список литературы

- Albrecht, S., Reffert, S., Snellen, I. A. G., Winn, J. N., 2009, Nature, 461, 373
- Batten, A. H., 1989, Space Science Reviews, 50, 1
- Burggraaff, O., Talens, G., J. J., Spronck, J., et al., 2018, Astron. Astrophys., 617, A32
- Eker, Z., Bilir, S., Soydugan, F., et al., 2014, Publications of the Astronomical Society of Australia, 31, e024
- Flower, P. J., 1996, Astrophys. J., 469, 355
- Goodricke, J., 1783, Philos. Trans. Royal Society of London, 73, 474
- Green, G. M., Schlafly, E. F., Finkbeiner, D. P., et al., 2015, Astrophys. J., 810, 25
- Hilditch, R. W., 1972, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 156, 471
- Hilditch, R. W., 1972, Mem. Roy. Astron. Soc., 76, 1
- Hilditch, R. W., 1972, Publ. Astron. Soc. Pacific, 84, 519
- Johnson, H. L., Sandage, A. R., 1955, Astrophys. J., 121, 616
- Khaliullin, K. F., Kozyreva, V. S., 1983, Astrophys. Space Sci., 94, 115
- Konacki, M., Wolszczan, A., Stairs, I.H., 2003, Astrophys. J., 589, 495
- Kron, G. E., Gordon, K. C., 1953, Astrophys. J., 118, 55
- Landolt, A. U., 1983, Astron. J., 88, 439

- Landolt, A. U., 2009, *Astron. J.*, 137, 4186
- Levi-Civita, T., 1937, *Amer. J. Math.*, 59, 225
- Mermilliod, J.-C., Mermilliod, M., Hauck, B., 1997, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 124, 349
- Moffat, J. W., 1984, *Astrophys. J. Lett.*, 287, L77
- Moffat, J. W., 1989, *Phys. Rev. D*, 39, 474
- Moffett, T. J., Barnes III, T. G., 1979, *Astron. J.*, 84, 627
- Popper, D. M., 1980, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 18, 115
- Russell, H. N., 1912, *Astrophys. J.*, 36, 54
- Russell, H. N., 1928, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 88, 641
- Schlafly, E. F., Finkbeiner, D. P., 2011, *Astrophys. J.*, 737, 103
- Shakura, N. I., 1985, *Soviet Astronomy Letters*, 11, 224
- Stassun, K. G., Oelkers, R. J., Paegert, M., 2019, *Astron. J.*, 158, 138
- Stebbins, J., 1928, *Publications of the Washburn Observatory*, 15, 41
- Vogel, H. C., 1889, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 2, 6, 27
- Volkov, I. M., Chochol, D., Grygar, J., et al., 2017, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 47, 29
- Volkov, I. M., 2020, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 50, 601.
- Корнилов, В. Г., Волков, И. М., Захаров, А. И., и др., 1991, *Каталог WBVR-величин ярких звезд северного неба*, Москва: МГУ
- Халиуллин, Х. Ф., 1974, *Астрономический Журнал*, 51, 395
- Черепашук, А. М., 1975, докторская диссертация, Москва: МГУ