

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Подпись

Гранкин Константин Николаевич

**Физические свойства и эволюционный статус
молодых звезд малых и промежуточных масс**

1.3.1 – Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в отделе физики звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”.

Официальные оппоненты:

Вибе Дмитрий Зигфридович, д.ф.-м.н., проф. РАН, ИНАСАН, отдел физики и эволюции звезд, зав. отделом, г.н.с.; ИНАСАН, лаборатория исследования звезд с экзопланетами, г.н.с.; МГУ, химический факультет, кафедра лазерной химии, с.н.с.; Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Центр лабораторной астрофизики, с.н.с.

Погодин Михаил Александрович, д.ф.-м.н., с.н.с., ГАО РАН, лаборатория физики звезд, зав. лаб., г.н.с.

Расторгуев Алексей Сергеевич, д.ф.-м.н., проф., МГУ, физический факультет, кафедра экспериментальной астрономии, зав. кафедрой; МГУ, ГАИШ, отдел изучения Галактики и переменных звезд, зав. отделом

Защита состоится « 16 » июня 2022 года в 14:00 на заседании диссертационного совета МГУ.013.1(МГУ.01.02) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

e-mail: konstantin.grankin@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте ИАС "ИСТИНА":

<https://istina.msu.ru/dissertations/434989025/>

Автореферат разослан « 13 » апреля 2022 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук,

О.М. Белова

Подпись

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В конце 80-х – начале 90-х годов XX века в полной мере сформировались основы современного понимания природы молодых звезд, которые в ходе своей эволюции еще не достигли главной последовательности (pre-main-sequence stars, PMS звезды), и основных причин их спектральной и фотометрической переменности [1], [2], [3]. Настоятельно требовались координированные многолетние фотометрические наблюдения представительной выборки PMS звезд с целью определения основных физических параметров этих объектов, подробного изучения природы фотометрической переменности и уточнения их эволюционного статуса, что очень важно для проверки различных моделей эволюции молодых звезд. Такие многолетние однородные фотометрические наблюдения представительной выборки PMS звезд были выполнены в рамках программы ROTOR на Майданакской обсерватории в Узбекистане в течение более двадцати лет (1984–2006 гг.). Первоначально основные цели программы ROTOR заключались в исследовании причин нестационарности восьмидесяти восьми Ae/Be звезд Хербига (HAeBe), определении основных физических параметров HAeBe звезд, классификации различных групп HAeBe звезд, определении важнейших характеристик околозвездных образований HAeBe звезд и накоплении данных для изучения механизмов нестационарности этих объектов (см, например, В.С. Шевченко [4]). Позднее в программу ROTOR были включены молодые звезды малых масс типа Т Тельца (TTS) и родственные им объекты (см., например, Гранкин и др. [5]). В результате реализации этой программы было получено более ста тысяч UBVR-измерений для 370 объектов из различных областей звездообразования (ОЗ).

Явления активности солнечного типа, процессы магнитосферной аккре-

ции и переменная околозвездная экстинкция значительно усложняют задачу определения основных параметров молодых звезд и их эволюционного статуса, которые очень важны для тестирования моделей ранней звездной эволюции.

Попытки определить физические параметры нескольких десятков TTS в ОЗ Тельца–Возничего были предприняты в целом ряде работ, например [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Все эти исследования были выполнены корректно и методично. Тем не менее различия в значениях некоторых физических параметров для одних и тех же объектов оказались очень большими. Основные причины этих различий связаны со сложностью оценки температуры фотосферы (T_{eff}), степени вуалирования спектральных линий, межзвездного поглощения (A_V), максимального уровня блеска (V_{max}) и показателей цвета, соответствующих спокойной фотосфере звезды.

Например, Инглеби и др. [18] проанализировали литературные оценки экстинкции для 13 классических звезд типа Т Тельца (CTTS) и показали, что для половины объектов разброс в значениях A_V достигает ± 0.5 . Такая неопределенность в значениях A_V может привести к неопределенности в один порядок при оценке темпа аккреции и некоторых других физических параметров CTTS. В некоторых случаях различия в оценках A_V могут быть очень большими: ± 1.2 для DF Тау, ± 1.6 для DO Тау и ± 2.7 для DG Тау ([19], [20], [17]). Херцег и Хилленбранд [17] справедливо заметили, что значительные неопределенности в оценках A_V и других параметров CTTS заставляют относиться с большим скептицизмом к способности использовать основные свойства CTTS для проверки теории образования и эволюции звезд на стадии PMS.

Тем не менее существует возможность получить вполне реалистичные оценки A_V и других параметров PMS звезд, если использовать долговременную однородную многоцветную фотометрию этих объектов. Анализ большого числа оценок блеска в нескольких полосах (например, в U, B, V и R) позволяет с вы-

сокой точностью определить значения максимального и минимального блеска, а также установить надежные зависимости между изменением блеска и показателями цвета. В свою очередь, знание этих параметров фотометрического поведения PMS звезд дает возможность с хорошей точностью оценить избытки цвета, которые обусловлены либо процессами аккреции, либо наличием холодных протяженных пятен, либо переменной околозвездной экстинкцией. Учет этих избытков позволяет определить значения блеска и показателей цвета, которые соответствуют собственной фотосфере PMS звезд, а значит, вычислить надежные значения A_V и других параметров молодых звезд.

Таким образом, чтобы определить надежные значения физических параметров представительной выборки PMS звезд и уточнить их эволюционный статус, необходимо использовать долговременные однородные многоцветные фотометрические наблюдения таких объектов. Именно такие многолетние фотометрические наблюдения представительной выборки PMS звезд и были выполнены в рамках программы ROTOR на Майданакской обсерватории в Узбекистане в течение более двадцати лет (1984–2006 гг.).

Цели и задачи диссертационной работы

В настоящей диссертации проанализированы уникальные однородные многолетние фотометрические наблюдения 72 классических звезд типа Т Тельца (CTTS), 42 звезд типа Т Тельца со слабыми эмиссионными линиями (WTTS) и 62 кандидатов в PMS звезды из списка Вихмана [21], которые были получены в рамках программы ROTOR. Большинство кандидатов в PMS звезды были первоначально классифицированы как объекты после стадии TTS (post T Tauri stars, PTTS).

Основные цели диссертационной работы заключаются в определении надежных физических параметров представительной выборки CTTS, WTTS и PMS звезд из ОЗ Тельца–Возничего, в уточнении их эволюционного статуса, в

идентификации различных типов долговременной фотометрической переменности, в подробном анализе свойств нескольких избранных объектов, демонстрирующих различные типы фотометрической и спектральной переменности.

Для достижения этих целей были поставлены следующие задачи:

- Выполнить статистический анализ многолетних кривых блеска более восьмидесяти молодых звезд в ОЗ Тельца–Возничего на основе данных программы ROTOR.
- Классифицировать кривые блеска и попытаться выделить различные типы фотометрического поведения в зависимости от основного физического механизма: переменной околозвездной экстинкции, пятенной вращательной модуляции или нестационарной магнитосферной аккреции.
- Выявить объекты с проявлением эффектов пятенной вращательной модуляции, уточнить периоды вращения запятненных звезд, определить основные параметры запятненных областей и исследовать их эволюцию с течением времени.
- Предложить оригинальную методику для определения надежных значений межзвездной экстинкции с использованием однородных многолетних высокоточных фотометрических данных.
- Определить надежные физические параметры звезд выборки, такие как светимость, радиус, массу и возраст.
- На основе надежных физических параметров и литературных данных о собственном движении и эквивалентной ширине линии L_i уточнить эволюционный статус объектов выборки.

- Проанализировать возможные зависимости между различными индикаторами магнитной активности и вращением запятненных молодых звезд из ОЗ Тельца–Возничего.
- Выявить наиболее интересные объекты выборки, фотометрическое и спектральное поведение которых обусловлено преимущественно одним физическим механизмом. Выполнить комплексные детальные исследования отобранных кандидатов.

Объект и предмет исследования

Объектом данного исследования является процесс рождения и ранней эволюции звезд малых и промежуточных масс. Чтобы понять и объяснить этот процесс используются десятки различных моделей ранней звездной эволюции. Основные различия между моделями обусловлены сложными и разнообразными предположениями относительно уравнения состояния вещества, его непрозрачности и той физики, которая описывает атмосферу, конвекцию и граничные условия. Дополнительные различия между модельными предсказаниями возникают при попытках учета эффектов вращения, особенностей химического состава, процесса аккреции, наличия магнитных полей и даже пыли в атмосферах маломассивных звезд и коричневых карликов.

Предметом данного исследования являются физические параметры и эволюционный статус PMS звезд малых и промежуточных масс. Знание точных физических свойств молодых звезд позволяет проверить и ограничить различные модели ранней звездной эволюции и в конечном счете понять, как формируются и эволюционируют звезды, протопланетные диски и сами планеты в течение первых десятков миллионов лет.

Научная новизна

Основные результаты диссертационной работы являются новыми и заклю-

чаются в следующем:

- Применен статистический подход к описанию свойств многолетних кривых блеска 49 CTTS, 27 WTTS и 6 кандидатов в PMS звезды. Впервые предложены два новых статистических параметра, характеризующих тип многолетней кривой блеска.
- Предложена оригинальная методика для определения надежных значений межзвездной экстинкции с использованием многолетних фотометрических данных. На основе однородной базы данных и в рамках единого подхода вычислены аккуратные значения физических параметров 35 CTTS, 24 WTTS и 50 кандидатов в PMS звезды. Показано, что среди 50 кандидатов в PMS звезды имеется 21 объект с возрастом от 1 до 10 млн лет и 29 объектов с возрастом от 11 до 100 млн лет.
- Впервые обнаружены периодические изменения блеска у 22 кандидатов в PMS звезды и подтверждены или уточнены периоды для 30 WTTS и 19 кандидатов в PMS звезды. Показано, что эти периодические изменения блеска обусловлены явлением пятенной вращательной модуляции.
- Отмечено, что фотометрическое поведение некоторых WTTS невозможно объяснить в рамках модели с одним высокоширотным пятном. Сделан вывод о том, что амплитуда периодического процесса характеризует степень неоднородности распределения пятен, а изменение среднего уровня блеска зависит от общей площади запятненных областей. Впервые показано, что в состоянии максимального уровня блеска группы пятен занимают от 30 до 79% видимой поверхности наиболее активных и молодых WTTS.
- Отмечено, что наиболее активные и молодые WTTS (с возрастом около 2–3 млн лет) характеризуются высоким уровнем запятненности, много-

летней стабильностью фазовых кривых блеска и низкой степенью дифференциального вращения (в 3–8 раз меньше солнечного). Обнаружено, что молодые WTTS демонстрируют периодические изменения блеска гораздо чаще, чем более проэволюционировавшие кандидаты в PMS звезды.

- Предложена схема классификации эволюционного статуса объектов выборки с учетом оценок возраста и литературных данных о собственных движениях и эквивалентных ширинах линии Li I. Согласно этой схеме, 30% кандидатов в PMS объекты являются надежными WTTS и 32% этих объектов принадлежат к надежным PTTS. Три объекта из списка Вихмана с возрастом ~ 100 млн лет классифицированы как звезды начальной главной последовательности (НГП).
- Показано, что распределение 57 звезд выборки с известными периодами вращения на диаграмме „период вращения – возраст“ можно объяснить различным временем активного взаимодействия между звездой и диском, которое продолжается от 0.7 до 10 млн лет. Средний возраст более молодой подгруппы WTTS (2.3 млн лет) практически совпадает с моментом прекращения фазы дисковой аккреции. Отмечено, что время рассеивания протопланетных дисков в этой ОЗ, начиная с момента прекращения процесса аккреции, может быть очень коротким, около 0.4 млн лет.
- Показано, что объекты выборки с известными периодами вращения находятся в режиме насыщенного динамо, когда нет значимой корреляции между индикаторами рентгеновской активности и угловым моментом вращения. Максимальная амплитуда переменности блеска в среднем уменьшается с увеличением возраста объектов выборки и увеличивается с увеличением $EW(H_\alpha)$ и $EW(Li I)$. Обнаружена статистически значимая зависимость между $EW(Li I)$ и возрастом PMS звезд солнечной массы (от 0.7

до $1.2 M_{\odot}$): чем больше возраст, тем меньше значение $EW(\text{Li I})$.

- Уточнен период вращения WTTS V410 Tau до пятого знака после запятой и вычислены обновленные эфемериды ее кривой блеска: $JD_{min} = JD2452234.285971 + 1.871970(\pm 0.000010)E$. Изменения рентгеновского потока и потока в линии H_{α} не показывают корреляции с пятенной вращательной модуляцией, наблюдаемой в фотометрической кривой блеска. Во время интенсивной 11-дневной фотометрической кампании зарегистрировано 9 вспышек. Вспышки на V410 Tau происходят с частотой ~ 2 события в сутки и превосходят по своей энергетике самые мощные вспышки, обнаруженные на звездах типа UV Cet и RS CVn (до 9.4×10^{36} эрг). Обнаружена непрерывная микровспышечная активность, которая проявляется в широком эмиссионном компоненте линии H_{α} .
- Впервые показано, что учет поправок за сильную запятненность V410 Tau (47–53%) увеличивает оценки ее возраста и массы. Обнаружено, что эпоха стабильного фотометрического поведения V410 Tau, длившаяся около 20 лет, закончилась в 2007 г., когда амплитуда периодического процесса достигла своего минимального значения $0.^m05$. На протяжении следующих 10 лет V410 Tau демонстрировала более сложную форму кривой блеска. Показано, что значительное уменьшение амплитуды периодического процесса связано с тем, что пятна распределились по звездной поверхности почти равномерно.
- Подтверждено значительное сходство между спектральным и фотометрическим поведением AA Tau и LkCa 15, которое хорошо объясняется в рамках современных моделей нестационарной магнитосферной аккреции. Фотометрический минимум блеска этих звезд совпадает по фазе с максимальным вуалированием и минимальной лучевой скоростью. Это свиде-

тельствует о том, что горячее аккреционное пятно, холодная фотосферная запятненная область и деформация внутреннего диска согласованы друг с другом по фазе. Показано, что магнитные полюса дипольного компонента магнитного поля AA Tau и LkCa 15 пространственно совпадают с протяженными холодными запятненными областями на уровне фотосферы и с аккреционными пятнами на хромосферном уровне.

- Отмечено, что темп аккреции у поверхности AA Tau значительно меньше, чем на внутреннем крае диска, который расположен на радиусе коротации. Это говорит о том, что этот объект находится в режиме пропеллера, когда большая часть аккрецирующего вещества во внутренних областях диска выбрасывается наружу, и только небольшая часть вещества достигает поверхности звезды. Для обоих объектов обнаружено значительное рассогласование в углах наклона между внутренним и внешним диском.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для выбора, уточнения и ограничения различных теоретических моделей ранней звездной эволюции, учитывающих магнитную активность, взаимодействие с протопланетным диском и формирование планетных систем. Полученные в диссертации выводы могут быть включены в курсы лекций по ранним стадиям эволюции звезд малых и промежуточных масс во всех научно-образовательных учреждениях, где изучаются проблемы звездообразования.

Методология диссертационного исследования

Фотометрические, поляриметрические и спектральные наблюдения. Статистический и периодограммный анализ многолетних временных рядов. Корреляционные зависимости между различными физическими параметрами звезд. Моделирование фотометрических вариаций многоцветных кривых блеска. Ана-

лиз переменности лучевых скоростей и эквивалентных ширин спектральных линий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Долговременное фотометрическое поведение молодых классических звезд типа Т Тельца AA Tau, RY Tau, LkCa 15, V521 Cyg и CO Ori вызвано преимущественно переменной околозвездной экстинкцией. Особенности кривых блеска DF Tau, HN Tau и V853 Oph свидетельствуют о решающей роли нестационарной аккреции. Периодические изменения блеска у 30 молодых звезд типа Т Тельца со слабыми эмиссионными линиями и 39 кандидатов в молодые звезды, расположенных в области звездообразования Тельца–Возничего, обусловлены одним и тем же механизмом – явлением пятенной вращательной модуляции.
2. 35 классических звезд типа Т Тельца и 35 слабоэмиссионных звезд типа Т Тельца в области звездообразования Тельца–Возничего показывают одинаковые бимодальные распределения по массам и возрастам. Средний возраст более молодой подгруппы слабоэмиссионных звезд типа Т Тельца (~ 2.3 миллиона лет) практически совпадает со временем прекращения фазы дисковой аккреции, определенным из анализа представительной выборки маломассивных звезд в семи молодых звездных скоплениях. Время рассеивания протопланетных дисков, отсчитываемое от момента прекращения процесса аккреции, может быть очень коротким, около 0.4 миллиона лет.
3. В подгруппе слабоэмиссионных звезд типа Т Тельца имеется семь звезд с другим эволюционным статусом: пять объектов с возрастом 10–30 миллионов лет и два объекта с возрастом порядка 100 миллионов лет. Среди 50 кандидатов в молодые звезды 30% объектов ($t < 10$ миллионов лет)

принадлежат к подгруппе слабоэмиссионных звезд типа Т Тельца и 32% объектов ($t \simeq 10 - 45$ миллионов лет) относятся к звездам, которые недавно прошли стадию звезд типа Т Тельца.

4. В состоянии максимального блеска группы пятен могут занимать десятки процентов поверхности молодых запятненных звезд. Периодические изменения блеска регистрируются значительно чаще у самых молодых слабоэмиссионных звезд типа Т Тельца и заметно реже у объектов, которые недавно прошли эту стадию. Характер распределения пятен по поверхности молодых звезд зависит от возраста и свидетельствует об изменении топологии магнитного поля с течением времени.
5. Вспышки на V410 Тау превышают по своей энергии самые мощные вспышки на звездах типа UV Cet и RS CVn ($\geq 9.4 \times 10^{36}$ эрг). Непрерывная микровспышечная активность, которая проявляется через широкий эмиссионный компонент линии H_{α} , может быть источником нагрева короны и может отвечать за спокойное рентгеновское излучение звезды. Значительное уменьшение амплитуды периодического процесса ($\sim 0.^m05$) в 2007 г. вызвано более равномерным распределением пятен по звездной поверхности, что может быть следствием значительного изменения топологии магнитного поля V410 Тау, имевшего место в 2006–2008 годах.
6. Спектральные и фотометрические свойства AA Тау и LkCa 15 обусловлены динамическим взаимодействием внутреннего деформированного околозвездного диска с дипольной составляющей магнитного поля, наклоненной относительно оси вращения звезды. AA Тау находится в режиме пропеллера, когда большая часть аккрецирующего вещества выбрасывается наружу. Компактные внутренние диски этих двух систем заметно наклонены по отношению ко внешним дискам.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов определяется использованием высокоточных многолетних фотометрических наблюдений, полученных на высокогорной обсерватории Майданак и в КрАО. Многие результаты основаны на анализе серии спектров высокого разрешения, полученных на 2-м телескопе TBL (со спектрографом NARVAL), на 3.6-м телескопе CFHT (со спектрографом ESPaDOnS) и на 3.6-м телескопе ESO (со спектрографом HARPS-Pol). При анализе данных проводилась оценка достоверности получаемых величин.

Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на астрофизических семинарах КрАО РАН, на конференциях в CAO РАН, ГАО РАН и нескольких конференциях ВАК. В том числе, на следующих международных конференциях и симпозиумах:

- "Low Mass Star Formation - from Infall to Outflow", Poster proceedings of IAU Symposium No. 182., Chamonix, France, January 20–24, 1997.
- National Meeting JENAM 2001 of the European Astronomical Society and the Astronomische Gesellschaft, Munich, Germany, September 10–15, 2001.
- Poster Proceedings of "1st Potsdam Thinkshop on Sunspots and Starspots", Potsdam, Germany, May 6–10, 2002.
- "Protostars and Planets V", Proceedings of the Conference, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, October 24–28, 2005.
- JENAM-2007, "Our non-stable Universe", Yerevan, Armenia, August 20–25, 2007.
- "Protostars and Planets VI", Heidelberg, Germany, July 15–20, 2013.

- "Stars: From Collapse to Collapse", Proceedings of the Conference, Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia, October 3–7, 2016.
- "Non-Stable Universe: Energetic Resources, Activity Phenomena and Evolutionary Processes", International Symposium, Byurakan, Armenia, September 19–23, 2016.
- SF2A 2019 "Evolution of massive stars and binary systems as progenitors of gravitational waves emitters", Proceedings of the Annual Meeting, Nice, France, May 14–17, 2019.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 30 печатных работах, которые опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности. Число ссылок на эти работы на начало октября 2021 года превышает 1300.

Публикации в журналах Web of Science/Scopus/RSCI:

01. Гранкин К. Н., Ибрагимов М. А., Кондратьев В. Б. и др. Фотометрическое исследование свойств пятенной вращательной модуляции для слабоэмиссионных звезд типа Т Тельца в темных облаках Тельца-Возничего / *Астрономический журнал (Astronomicheskii Zhurnal)*. — 1995. — Т. 72. — С. 894–904. (РИНЦ IF: 1.289)//Переводная версия: Grankin K.N., Ibragimov M.A., Kondrat'ev V.B., Mel'nikov S.Yu., Shevchenko V.S. Photometric study of the properties of spot rotational modulation in weak line T Tauri stars/ *Astronomy Reports*. — 1995. — Vol. 39.— P. 799–807. (WoS IF 2020: 0.925)

02. Bouvier J., Wichmann R., Grankin K., et al. COYOTES IV: the rotational periods of low-mass Post-T Tauri stars in Taurus // *Astronomy and Astrophysics*. — 1997. — Vol. 318. — P. 495–505. (WoS IF 2020: 5.802)

03. Гранкин К. Вращение и активность молодых звезд поздних спектральных классов. Оптическая переменность блеска восьми звезд типа Т Тельца со слабыми эмиссионными линиями в 1992-1995 гг. / Письма в Астрономический журнал. — 1997. — Т. 23. — С. 700–708. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Grankin K.N. Rotation and activity of young late-type stars: Optical variability of eight weak-line T Tauri stars during 1992-1995/ Astronomy Letters. — 1997. — Vol. 23. — P. 615–622. (WoS IF 2020: 1.055)

04. Гранкин К. Оптическая переменность блеска HBC 379 и HBC 426 в 1990-1995 гг. / Письма в Астрономический журнал. — 1998а. — Т. 24. — С. 54–57. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Grankin K.N. Optical variability of HBC 379 and HBC 426 during 1990-1995/ Astronomy Letters. — 1998а. — Vol. 24. — P. 48–51. (WoS IF 2020: 1.055)

05. Гранкин К. Анализ многолетних наблюдений четырех звезд типа Т Тельца со слабыми эмиссионными линиями / Письма в Астрономический журнал. — 1998б. — Т. 24. — С. 580–590. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Grankin K.N. Analysis of long-term observations of four weak-line T Tauri stars/ Astronomy Letters. — 1998b. — Vol. 24. — P. 497–506. (WoS IF 2020: 1.055)

06. Гранкин К. Эволюция кривой блеска V410 Тау в 1986-1997 гг./ Письма в Астрономический журнал. — 1999. — Т. 25. — С. 611–621. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Grankin K.N. Evolution of the light curve of V410 Tau during 1986-1997/ Astronomy Letters. — 1999. — Vol. 25. — P. 526–535. (WoS IF 2020: 1.055)

07. Menard F., Bouvier J., Dougados C., Mel'nikov S. Y., Grankin K. N. Constraints on the disk geometry of the T Tauri star AA Tau from linear polarimetry //Astronomy and Astrophysics. — 2003. — Vol. 409. — P. 163-167. (WoS IF 2020: 5.802)

08. Bouvier J., Grankin K. N., Alencar S. H. P., et al. Eclipses by circumstellar

material in the T Tauri star AA Tau. II. Evidence for non-stationary magnetospheric accretion // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — Vol. 409. — P. 169-192. (WoS IF 2020: 5.802)

09. Stelzer B., Fernandez M., Costa V., Gameiro J. F., Grankin K., et al. The weak-line T Tauri star V410 Tau. I. A multi-wavelength study of variability // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — Vol. 411. — P. 517–531. (WoS IF 2020: 5.802)

10. Fernandez M., Stelzer B., Henden A., Grankin K., et al. The weak-line T Tauri star V410 Tau. II. A flaring star // *Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — Vol. 427. — P. 263–278. (WoS IF 2020: 5.802)

11. Мельников С. Ю., Гранкин К. Н. Исследование оптической переменности Т Тау в 1962-2003 гг. / Письма в *Астрономический журнал*. — 2005. — Т. 31. — С. 122–130. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Mel'nikov S.Yu., Grankin K.N. Study of the optical variability of T Tau in the period 1962-2003/ *Astronomy Letters*. — 2005. — Vol. 31. — P. 109–116. (WoS IF 2020: 1.055)

12. Grankin K. N., Melnikov S. Y., Bouvier J., et al. Results of the ROTOR-program. I. The long-term photometric variability of classical T Tauri stars // *Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — Vol. 461. — P. 183–195. (WoS IF 2020: 5.802)

13. Bouvier J., Alencar S. H. P., Bouvier T., Dougados C., Balog Z., Grankin K., et al. Magnetospheric accretion-ejection processes in the classical T Tauri star AA Tauri // *Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — Vol. 463. — P. 1017–1028. (WoS IF 2020: 5.802)

14. Grosso N., Bouvier J., Montmerle T., Fernandez M., Grankin K., et al. Observation of enhanced X-ray emission from the CTTS AA Tauri during one transit of an accretion funnel flow // *Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — Vol. 475. — P. 607-617. (WoS IF 2020: 5.802)

15. Grankin K. N., Bouvier J., Herbst W., Melnikov S. Y. Results of the ROTOR-program. II. The long-term photometric variability of weak-line T Tauri stars // *Astronomy and Astrophysics*. — 2008. — Vol. 479. — P. 827–843. (WoS IF 2020: 5.802)

16. Skelly M. B., Donati J.-F., Bouvier J., Grankin K. N., et al. Dynamo processes in the T Tauri star V410 Tau // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — Vol. 403. — P. 159–169. (WoS IF 2020: 5.287)

17. Donati J.-F., Skelly M. B., Bouvier J., Gregory, S. G., Grankin K. N., et al. Magnetospheric accretion and spin-down of the prototypical classical T Tauri star AA Tau // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — Vol. 409. — P. 1347–1361. (WoS IF 2020: 5.287)

18. Артеменко С. А., Гранкин К. Н., Петров П. П. Эффекты вращения в классических звездах типа Т Тельца / *Письма в Астрономический журнал*. — 2012. — Т. 38. — С. 872–882. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Artemenko S.A., Grankin K.N., Petrov, P.P. Rotation effects in classical T Tauri stars / *Astronomy Letters*. — 2012. — Vol. 38. — P. 783–792. (WoS IF 2020: 1.055)

19. Гранкин К. Н. Магнитно-активные звезды в Тельце–Возничем: Фотометрическая переменность и основные физические параметры / *Письма в Астрономический журнал*. — 2013а. — Т. 39. — С. 280–296. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Grankin K.N. Magnetically active stars in Taurus-Auriga: Photometric variability and basic physical parameters / *Astronomy Letters*. — 2013а. — Vol. 39. — P. 251–266. (WoS IF 2020: 1.055)

20. Гранкин К. Н. Магнитно-активные звезды в Тельце–Возничем: эволюционный статус / *Письма в Астрономический журнал*. — 2013б. — Т. 39. — С. 376–389. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Grankin K.N. Magnetically active stars in Taurus-Auriga: Evolutionary status / *Astronomy Letters*. — 2013б. — Vol. 39. — P. 336–346. (WoS IF 2020: 1.055)

21. Гранкин К. Н. Магнитно-активные звезды в Тельце–Возничем: активность и вращение // Письма в Астрономический журнал. — 2013с. — Т. 39. — С. 508–520. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Grankin K.N. Magnetically active stars in Taurus-Auriga: Activity and rotation / Astronomy Letters. — 2013с. — Vol. 39. — P. 446–457. (WoS IF 2020: 1.055)

22. Bouvier J., Grankin K., Ellerbroek L. E., et al. AA Tauri's sudden and long-lasting deepening: enhanced extinction by its circumstellar disk // Astronomy and Astrophysics. — 2013. — Vol. 557. — P. A77. 9 pp. (WoS IF 2020: 5.802)

23. Donati J.-F., Hébrard E., Hussain G., Moutou C., Grankin K., et al. Modeling the magnetic activity and filtering radial velocity curves of young Suns: the weak-line T Tauri star LkCa 4 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2014. — Vol. 444. — P. 3220-3229. (WoS IF 2020: 5.287)

24. Donati J.-F., Hébrard E., Hussain G. A. J., Moutou C., Malo L., Grankin K., et al. Magnetic activity and hot Jupiters of young Suns: the weak-line T Tauri stars V819 Tau and V830 Tau // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2015. — Vol. 453. — P. 3706–3719. (WoS IF 2020: 5.287)

25. Гранкин К. Н. Звезды типа Т Тельца: физические параметры и эволюционный статус / Письма в Астрономический журнал. — 2016. — Т. 42. — С. 353–368. (РИНЦ IF: 1.469)// Переводная версия: Grankin K.N. T Tauri stars: Physical parameters and evolutionary status / Astronomy Letters. — 2016. — Vol. 42. — P. 314–328. (WoS IF 2020: 1.055)

26. Gully-Santiago M. A., Herczeg G. J., Czekala I., Somers G., Grankin K., et al. Placing the Spotted T Tauri Star LkCa 4 on an HR Diagram // Astrophysical Journal. — 2017. — Vol. 836. — Num. 2:200 – P. 1–23. (WoS IF 2020: 5.874)

27. Donati J.-F., Yu L., Moutou C., Cameron A. C., Malo L., Grankin K., et al. The hot Jupiter of the magnetically active weak-line T Tauri star V830 Tau // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — Vol. 465. — P.

3343–3360. (WoS IF 2020: 5.287)

28. Yu L., Donati J.-F., Hébrard E. M., Moutou C., Malo L., Grankin K., et al. A hot Jupiter around the very active weak-line T Tauri star TAP 26 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — Vol. 467. — P. 1342–1359. (WoS IF 2020: 5.287)

29. Alencar S. H. P., Bouvier J., Donati J.-F., Alecian E., Folsom C. P., Grankin K., et al. Inner disk structure of the classical T Tauri star LkCa 15 // Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Vol. 620. id.A195. 15 pp. (WoS IF 2020: 5.802)

30. Yu L., Donati J.-F., Grankin K. N., et al. Magnetic field, activity, and companions of V410 Tau // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — Vol. 489. — P. 5556–5572. (WoS IF 2020: 5.287)

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Восемь из тридцати работ опубликованы без соавторов (статьи **3–6, 19–21, 25**). Все представленные в них результаты получены лично автором. Подготовка к публикации полученных результатов в других двадцати двух работах проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта в работах **1, 12** и **15** был определяющим. Вклад диссертанта в работах **2, 8–11, 16, 18, 22** и **30** был не меньшим, чем других соавторов. В работах **17, 23, 24, 26–28**, выполненных в рамках международных проектов MaPP и MaTYSSE, диссертант отвечал за выбор потенциальных объектов планируемых исследований, осуществлял фотометрические наблюдения и их редукцию к стандартной фотометрической системе, участвовал в обсуждении и интерпретации полученных фотометрических и спектральных данных. В работах **7, 13, 14** и **29** автор принимал участие в анализе и интерпретации полученных результатов.

Обработка, редукция, статистический и периодограммный анализ всего фо-

тометрического материала осуществлялись с помощью пакета программ, реализованного автором диссертации в среде программирования Delphi. Более 28% наблюдений 72 CTTS, 42 WTTS и 62 кандидатов в PMS звезды было получено автором в течение 1984–2006 гг.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из обзора литературы, введения, 7 глав, заключения, списка сокращений, библиографии и 2-х приложений. Общий объем диссертации 372 страницы, из них 324 страницы текста, включая 101 рисунок и 28 таблиц. Библиография включает 396 наименований на 38 страницах. Приложения А и Б занимают 5 и 5 страниц соответственно.

Содержание работы

Обзор литературы посвящен основным работам, которые сыграли ключевую роль в нашем понимании природы молодых звезд, которые способствовали определению основных звездных параметров и изучению тех физических процессов, которые оказывают влияние на формирование и эволюцию звезд на стадии до главной последовательности. В обзоре литературы упомянуты работы, опубликованные между 1852 и 1995 гг.

Во Введении дается общее описание диссертационной работы, обосновывается актуальность исследования, формулируются цели и задачи работы. Аргументируется научная новизна исследований, обосновывается теоретическая и практическая значимость работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Отмечается степень достоверности и апробация результатов. Приводится список публикаций, в которых были представлены основные результаты диссертации, и указан личный вклад автора.

В первой главе представлены результаты анализа долговременных мно-

гоцветных фотометрических наблюдений 52 CTTS, 42 WTTS и 62 кандидатов в PMS звезды, которые были получены на Майданакской обсерватории в Узбекистане в течение двух десятилетий лет, с 1986 по 2006 г. Кратко обсуждаются условия наблюдений, описаны основные этапы первичной обработки данных, приведены параметры окончательных кривых блеска. Представлены результаты статистического анализа многолетних кривых блеска 82 объектов выборки, выделено несколько типов фотометрического поведения и обсуждаются основные физические механизмы различных типов фотометрической переменности.

Основные результаты первой главы опубликованы в работах **11–12** и **15**. Общая цитируемость этих работ превышает 236.

Во второй главе исследуется явление пятенной вращательной модуляции среди 42 WTTS и 62 кандидатов в PMS звезды из списка Вихмана. Показано, что периодические изменения блеска демонстрируют 30 WTTS и 39 кандидатов в PMS звезды. Обсуждаются особенности периодических кривых блеска и их эволюция во времени. В третьем разделе главы представлена простая фотометрическая модель звездных пятен, которая позволяет оценить площадь запятенной поверхности и ее среднюю температуру. Приводятся результаты применения этой фотометрической модели к многоцветным кривым блеска шести WTTS. В четвертом разделе главы обсуждаются основные особенности наиболее активных и молодых WTTS.

Результаты второй главы опубликованы в работах **1–6**, **15**, **19** и **23–24**. Общая цитируемость этих работ превышает 262.

В третьей главе описана процедура определения физических параметров молодых звезд, обсуждены источники и величины ошибок, приведены наиболее надежные значения эффективной температуры, межзвездной экстинкции, светимости, радиуса, массы и возраста для 35 CTTS, 24 WTTS и 50 кандидатов в PMS звезды. Подробно обсуждается оригинальная методика для определения

надежных значений межзвездной экстинкции на основе высокоточных однородных многолетних фотометрических данных.

Результаты третьей главы опубликованы в работах **19** и **25**. Общая цитируемость этих работ превышает 18.

В четвертой главе подробно обсуждаются свойства и эволюционный статус 35 CTTS, 30 WTTS и 60 кандидатов в PMS звезды. На основе аккуратных данных об основных физических параметрах, определенных в предыдущих главах, и литературных данных о собственном движении и эквивалентной ширине линии Li I уточнен эволюционный статус 24 WTTS и 50 кандидатов в PMS звезды и проанализированы различные зависимости между вращением, массой и возрастом этих объектов. Сравняются физические свойства WTTS и CTTS.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах **18–20**. Общая цитируемость этих работ превышает 41.

В пятой главе проанализированы возможные зависимости между вращением 70 звезд нашей выборки (как WTTS, так и PTTS) и различными индикаторами магнитной активности: рентгеновской светимостью (L_X), рентгеновским поверхностным потоком (F_X) и избытком рентгеновской светимости (L_X/L_{bol}). Обсуждается положение звезд выборки на диаграмме Россби. Анализируются зависимости между максимальной амплитудой переменности блеска, возрастом, $EW(H_\alpha)$ и $EW(Li I)$.

Результаты пятой главы опубликованы в работах **19–21**. Общая цитируемость этих работ превышает 12.

В шестой главе представлены результаты нескольких кооперативных программ исследований V410 Tau, одной из самых молодых и активных WTTS нашей выборки. Обсуждается рентгеновская, хромосферная и фотосферная активность этой звезды. Оценивается частота и энергетика звездных вспышек. Проанализировано влияние сильной запытенности звезды на определение ее

основных физических параметров. Обсуждаются возможные причины кардинального изменения фотометрического поведения этого объекта, имевшего место в 2007 г.

Приводятся результаты длительного спектрополяриметрического мониторинга, выполненного в 2008–2016 гг., и анализируются яркостные и магнитные карты, реконструированные с использованием метода доплер-зеemanовского картирования. Обсуждается сложная топология магнитного поля с переменными полоидальным и тороидальным компонентами. Отмечен факт низкого уровня дифференциального вращения этой звезды.

Результаты шестой главы опубликованы в работах **9–10, 16, 26–28** и **30**. Общая цитируемость этих работ превышает 254.

В седьмой главе подробно исследован процесс магнитосферной аккреции на примере двух CTTS: AA Tau и LkCa 15. Обсуждены особенности фотометрического поведения и спектральные свойства этих объектов. Приводятся результаты реконструкции карт магнитного поля, поверхностной яркости и хромосферной эмиссии. Отмечено, что AA Tau находится в режиме пропеллера, когда большая часть аккрецирующего вещества во внутренних областях диска выбрасывается наружу, и только небольшая часть вещества достигает поверхности звезды.

Приводятся многочисленные аргументы в пользу вывода о том, что фотометрическая и спектральная переменность этих объектов обусловлена одним и тем же процессом: динамическим взаимодействием внутреннего деформированного околозвездного диска с дипольной составляющей магнитного поля, которая наклонена относительно оси вращения звезды. Обсуждаются возможные причины рассогласования между внутренним и внешним дисками этих звезд.

Результаты седьмой главы опубликованы в работах **7–8, 13–14, 17–18, 22** и **29**. Общая цитируемость этих работ превышает 504.

В Заключении перечислены основные результаты, полученные в ходе диссертационной работы, и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

В Приложении А приведены долговременные кривые блеска 28 WTTS (A1), 48 CTTS (A2) и 24 звезд из списка Вихмана (A3).

В Приложении Б представлены долговременные фазовые кривые блеска 5 наиболее активных WTTS: LkCa 4 (Б1), LkCa 7 (Б2), V410 Tau (Б3), TAP 41 (Б4) и V830 Tau (Б5).

Цитированная литература

1. Appenzeller I., Mundt R. // *Astronomy and Astrophysics Review*. 1989. Vol. 1. P. 291–334.
2. Bertout C. // *Annual review of astronomy and astrophysics*. 1989. Vol. 27. P. 351–395.
3. Herbst W., Herbst D. K., Grossman E., Weinstein D. // *Astronomical Journal*. 1994. Vol. 108. P. 1906–1923.
4. Шевченко В. С. Ae/Be звезды Хербига. Ташкент: Фан, 1989.
5. Гранкин К. Н., Ибрагимов М. А., Кондратьев В. Б. и др. // *Астрономический Журнал*. 1995. Т. 72. С. 894–904.
6. Cohen M., Kuhl L. // *Astrophysical Journal Suppl. Ser.* 1979. Vol. 41. P. 743–843.
7. Strom K. M., Wilkin F. P., Strom S. E., Seaman R. L. // *Astronomical Journal*. 1989. Vol. 98. P. 1444–1450.
8. Valenti J. A., Basri G., Johns C. M. // *Astronomical Journal*. 1993. Vol. 106. P. 2024–2050.
9. Kenyon S. J., Hartmann L. // *Astrophysical Journal Suppl. Ser.* 1995. Vol.

101. P. 117–171.
10. Hartigan P., Edwards S., Ghandour L. // *Astrophysical Journal*. 1995. Vol. 452. P. 736–768.
 11. Gullbring E., Hartmann L., Briceno C., Calvet N. // *Astrophysical Journal*. 1998. Vol. 492. P. 323–341.
 12. White R. J., Ghez A. M. // *Astrophysical Journal*. 2001. Vol. 556. P. 265–295.
 13. Furlan E., Hartmann L., Calvet N. et al. // *Astrophysical Journal Suppl. Ser.* 2006. Vol. 165. P. 568–605.
 14. Rebull L. M., Padgett D. L., McCabe C. E. et al. // *Astrophysical Journal Suppl. Ser.* 2010. Vol. 186. P. 259–307.
 15. Furlan E., Luhman K. L., Espaillat C. et al. // *Astrophysical Journal Suppl. Ser.* 2011. Vol. 195. P. id. 3, 45 pp.
 16. Andrews S. M., Rosenfeld K. A., Kraus A. L., Wilner D. J. // *Astrophysical Journal*. 2013. Vol. 771. P. id. 129, 40 pp.
 17. Herczeg G. J., Hillenbrand L. A. // *Astrophysical Journal*. 2014. Vol. 786. P. id. 97, 32 pp.
 18. Ingleby L., Calvet N., Herczeg G. et al. // *Astrophysical Journal*. 2013. Vol. 767. P. id. 112, 20 pp.
 19. Fischer W., Edwards S., Hillenbrand L., Kwan J. // *Astrophysical Journal*. 2011. Vol. 730. P. id. 73, 27 pp.
 20. McClure M. K., Calvet N., Espaillat C. et al. // *Astrophysical Journal*. 2013. Vol. 769. P. id. 73, 17 pp.
 21. Wichmann R., Krautter J., Schmitt J. H. M. M. et al. // *Astronomy and Astrophysics*. 1996. Vol. 312. P. 439–454.