

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Желтоухов Сергей Геннадьевич

**Создание камеры среднего инфракрасного диапазона для 2.5
метрового телескопа КГО ГАИШ МГУ и исследование
пылевых оболочек вокруг звезд на поздних стадиях эволюции**

Специальность: 1.3.1 Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена на кафедре экспериментальной астрономии Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Кандидат физико-математических наук
Татарников Андрей Михайлович**

Официальные оппоненты: **Зинченко Игорь Иванович,**
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник (ученое звание), заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии отделения физики плазмы и электроники больших мощностей Института прикладной физики имени А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, профессор кафедры распространения радиоволн и радиоастрономии радиофизического факультета Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского

Мурга Мария Сергеевна,
кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь Института астрономии Российской академии наук, старший научный сотрудник отдела физики и эволюции звезд Института астрономии Российской академии наук, лаборант-исследователь лаборатории астрохимических исследований Института естественных наук и математики Уральского федерального университета имени первого президента России Б. Н. Ельцина

Прохоров Михаил Евгеньевич,
доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий лабораторией космических проектов Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга, профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Защита состоится 20 февраля 2025 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский п-кт, д. 13, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский п-кт, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3318>.

Автореферат разослан 17 января 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.013.1,

доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

В современной астрономии изучение объектов в инфракрасном диапазоне играет одну из ключевых ролей в понимании процессов, происходящих во Вселенной. Большое внимание уделяется среднему инфракрасному диапазону, который позволяет при наземных наблюдениях исследовать разнообразные астрономические объекты, включая пылевые оболочки вокруг звезд на поздних стадиях их эволюции. В данном контексте создание камеры среднего инфракрасного диапазона для 2.5-метрового телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ является актуальной задачей и представляет собой значимый шаг в развитии инфракрасной астрономии в России.

Инфракрасный диапазон занимает на шкале электромагнитных колебаний почти 10 октав, а видимый диапазон, в котором проводится подавляющее большинство астрономических наблюдений в нашей стране — всего одну. В ИК диапазоне можно наблюдать все типы астрономических объектов — от экзопланет и активных ядер галактик до тел Солнечной системы и искусственных спутников Земли. При этом наблюдения в ИК диапазоне имеют целый ряд преимуществ: максимум излучения холодных объектов (звезд поздних спектральных классов, пылевых оболочек, межзвездных газо-пылевых облаков и т.п.) приходится на ИК область спектра, малое межзвездное поглощение позволяет наблюдать объекты, скрытые за плотными пылевыми облаками, меньшая чувствительность к атмосферной турбулентности позволяет проще получать высокое угловое разрешение, а резкое падение рассеяния света в атмосфере Земли с ростом длины волны, позволяет проводить наблюдения в среднем ИК диапазоне днем.

Одной из целей данного исследования является разработка инструмента, способного обеспечить высокую чувствительность и точность измерений в коротковолновой части среднего инфракрасного диапазона, и применение его при исследовании околозвездных пылевых оболочек звезд, находящихся на поздних стадиях их эволюции. Для достижения поставленной цели был проведен анализ возможности наблюдений в данном диапазоне с имеющимися в ГАИШ телескопами, получены и исследованы характеристики камеры, разработано программное обеспечение для наблюдений и обработки данных и проведены наблюдения для проверки функциональности инструмента и определения его характеристик.

Важными задачами исследования являются оптимизация конструкции камеры, минимизация инструментального фона, анализ шумов считывания и кадров подложки, а также разработка методов обработки данных наблюдений. Полученные результаты могут иметь важное значение не только для астрономов, занимающихся изучением пылевых оболочек вокруг звезд разных типов, но и для специалистов, занимающихся разработкой инструментов для астрономических исследований в инфракрасном диапазоне длин волн.

Возможность проведения наблюдений слабых объектов в ИК диапазоне во многом зависит от места расположения обсерватории и его астроклимата. Регулярные наблюдения в этой области спектра ведутся у нас в стране в двух обсерваториях — Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ с одноэлементным фотометром на базе InSb-фотодиода [1] и Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (КГО, [2]) с камерой-спектрографом ASTRONIRCAM [3] на базе матричного детектора Hawaii-2RG, которая более подробно описана далее. Астроклимат КГО хорошо исследован. Эта обсерватория, благодаря большой высоте над уровнем моря (2110 м), низкому содержанию водяного пара в атмосфере (медианное значение PWV меньше 8 мм [4]) и высокому качеству изображений [5] хорошо подходит для наблюдений в ИК диапазоне. Согласно работе Tatarskiy et al. 2023 [6], в КГО в ближнем ИК диапазоне 1 квадратная угловая секунда фона ночного неба в среднем имеет блеск $J = 15.5^m$, $H = 13.7^m$, $K = 13.1^m$, что соответствует лучшим обсерваториям мира, расположенным на схожих высотах над уровнем моря. Крымская станция ГАИШ МГУ (КАС) характеризуется похожим на КГО количеством ясного времени, порядка 1400 часов в год. Она относится к равнинным обсерваториям, которые не предназначены для установки специализированных инфракрасных телескопов. Из-за малой высоты над уровнем моря (~ 600 метров) качество изображения и прозрачность в инфракрасном диапазоне в ней хуже, чем в КГО. А главное, в КАС гораздо выше как яркость фона неба (из-за большей толщи атмосферы), так и величина инструментального фона (из-за более высокой температуры окружающей среды).

В последние годы достигнут значительный прогресс в технологии производства приемников ИК диапазона — увеличиваются размеры чувствительной области, квантовая эффективность вплотную приблизилась к единице, снижается стоимость отдельных образцов детекторов. Оценки, выполненные в представляемой работе, показывают, что при использовании не оптимизированного к ИК наблюдениям наземного телескопа, на длинах волн до 5 мкм можно использовать современные коммерческие матричные приемники — шумовые ограничения при наблюдениях слабых объектов будут определяться в основном фоновым излучением, а не шумом самого детектора.

Следующей задачей этой работы было моделирование пылевых оболочек звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции, с использованием получаемых на описанных приборах данных. В основном речь будет идти о звездах асимптотической и пост-асимптотической ветви гигантов (AGB и post-AGB звезды). На эту стадию эволюции попадают звезды, имевшие на главной последовательности массы от 1 до $8 M_{\odot}$ [7]. На AGB и в начале эволюции на post-AGB стадиях эти звезды имеют низкие эффективные температуры (~ 3000K) и большие светимости (несколько тысяч и более светимостей Солнца). Такое сочетание параметров приводит к большим размерам звезд — сотни радиусов Солнца. Из-за этого во внешних разреженных холодных слоях атмосферы этих звезд существуют условия, способствующие образованию пыли. В свою очередь, пылинки ускоряются давлением излучения и, увлекая за собой газ, выносятся из

атмосферы. Исследования таких звезд важны, так как они являются основными поставщиками вещества в межзвездную среду [8]. Зная параметры пылевых оболочек, можно вычислять темп потери массы звездой, а значит и темп поступления вещества в межзвездную среду. Для упрощения выбора объектов для исследований и дальнейших наблюдений нами составлен каталог распределения энергии в спектрах звезд на поздних стадиях эволюции, наблюдавшихся космической обсерваторией ISO.

Для моделирования распределения энергии в спектрах холодных звезд, имеющих околос звездные пылевые оболочки, важно иметь качественные спектры в ближнем и среднем ИК диапазонах. Это позволяет получать более точные оценки параметров центральной звезды и относительного содержания пылинок разного состава в оболочке. Поэтому еще одной важной задачей работы являлась разработка и реализация алгоритма процедуры первичной редукции получаемых в ближнем ИК диапазоне данных, а также исследование и характеристика спектрального режима другого инфракрасного инструмента нашей обсерватории — камеры ASTRONIRCAM.

ASTRONIRCAM (The ASTROnomical Near InfraRed CAMera) — инструмент, установленный на 2.5 метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Камера работает в диапазоне длин волн от 1 до 2.5 мкм в двух режимах — фотометрическом (получение прямых снимков неба в фильтрах Y , J , H , K фотометрической системы МКО [9] и нескольких узкополосных фильтрах) и спектральном (получение спектров низкого разрешения с длинной или короткой щелью). Конструкция камеры, оптическая схема, параметры детектора и схемы регистрации описаны в статье Nadjip et al. 2017 [3].

В камере используется детектор HAWAII-2RG (на основе HgCdTe полупроводника). Его полная светочувствительная площадь (2048×2048 пикселей размером 18 мкм каждый) из-за особенностей конструкции не используется ни в спектральном, ни в фотометрическом режиме. Квантовая эффективность приемника в рабочем диапазоне длин волн весьма однородна и по поверхности, и в пространстве длин волн и равна $\sim 94\%$. Емкость ячейки $\sim 120000\text{ e}^-$, шум считывания 12 e^- . Изображение на матрице строится оптической схемой, состоящей из: входного окна, фокальной турели, в которой установлен набор из 10 спектральных щелей и квадратная входная диафрагма, вырезающая в проекции на небо область размером 4.6', коллиматора, двух колес светофильтров и камерного объектива. Для компактизации схемы используются три диагональных зеркала, сокращающих длину прибора и занимаемый им объем. Все оптические элементы располагаются на оптической скамье, в охлаждаемом жидком азоте криостате. Для уменьшения количества рассеянного света между ними установлены диафрагмы. Регистрация и оцифровка сигнала выполняется контроллером ARC Gen III 2000 [10]. Для получения калибровочных данных в спектральном режиме используется блок калибровки с установленной лампой накаливания (для получения плоских полей), и аргоновой лампой с линейчатым спектром, для калибровок по длине волны.

Детектор камеры работает в режиме попиксельного неразрушающего считывания (Non-Destructive Readouts, NDR). Это позволяет несколько раз читать сигнал в ходе накопления света, но ограничивает минимальную экспозицию — примерно ≈ 1.8 сек при работе в стандартном фотометрическом режиме. Результатом накопления является куб данных, каждый слой которого содержит результат однократного считывания данных с матрицы. Его обработка позволяет избавиться от шума и неравномерности подложки (bias), уменьшить шум считывания. Кроме того, становится возможным восстановить данные после переполнения ячейки в ходе накопления или воздействия космических лучей.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка и изготовление новой камеры ИК диапазона, создание алгоритмов наиболее эффективной обработки данных с существующих ИК приборов обсерватории КГО ГАИШ МГУ и исследования, с использованием собственных данных, пылевых оболочек звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции. Задачи можно кратко сформулировать следующим образом:

- Разработка и создание камеры среднего инфракрасного диапазона
- Разработка и создание эффективной системы обработки данных ИК камеры-спектрографа ASTRONIRCAM
- Составление каталога SED (Spectral Energy Distribution) звезд на поздних стадиях эволюции
- Определение параметров пылевых оболочек отобранных звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются пылевые оболочки звезд на поздних стадиях эволюции, а также инфракрасные детекторы КГО ГАИШ МГУ. Предметом исследования являются оптические и инфракрасные спектры и кривые блеска таких звезд, результаты собственных наблюдений на приборах КГО ГАИШ МГУ, результаты тестирования детекторов КГО ГАИШ МГУ.

Методология исследования

Для решения поставленных в работе задач были использованы общенаучные методы (анализ, дедукция, индукция). Результаты получены и анализировались с помощью авторского программного обеспечения. Для создания камеры использовались общетехнические методы, 3D проектирование и 3D моделирование, оптические расчеты, а также общие методы разработки программного обеспечения.

Научная новизна

Указанные результаты получены и опубликованы автором впервые.

- Разработана камера среднего инфракрасного диапазона LMP. Показано, что в нашем случае для коммерческих детекторов основной вклад в шум вносит собственное излучение телескопа, а не собственный шум детектора.
- Разработаны алгоритмы редукции инфракрасных данных с прибора ASTRONIRCAM, создан программный комплекс для их автоматической разработки. В том числе создана и протестирована феноменологическая модель персистенции его детектора.
- Получены оценки параметров пылевых оболочек звезд Т Dra, IRAS02143+5852 и V Cyg. Разработан алгоритм поиска параметров оболочек и соответствующее программное обеспечение, которые могут применяться и для других объектов.
- Создан и опубликован каталог SED звезд на поздних стадиях эволюции, рассчитаны сглаженные SED и светимости выбранных объектов. Показано, что только для 60% выбранных объектов спектры космического аппарата ISO из популярного атласа Sloan et al. 2003 [11] можно использовать без перекалибровки.

Теоретическая и практическая значимость

Создание новой камеры среднего инфракрасного диапазона позволит проводить ранее не возможные наблюдения в этом диапазоне, которые могут быть использованы не только для исследования звезд на поздних стадиях эволюции, но и множества других объектов, излучающих в этом диапазоне.

Новые алгоритмы обработки наблюдений в ближнем ИК диапазоне позволяют повысить точность и воспроизводимость получаемых с прибором ASTRONIRCAM данных, а соответственно исследовать более слабые объекты. А также значительно увеличивает скорость обработки данных и уменьшает вероятность ошибок при обработке.

Определение параметров пылевых оболочек звезд может помочь в исследовании поздних стадий эволюции звезд. Эти звезды являются основными поставщиками вещества в межзвездную среду, так что получение параметров оболочек, включая темп потери вещества, помогает исследовать процессы поступления вещества в межзвездную среду.

Созданный каталог звезд на поздних стадиях эволюции позволит выбрать интересные объекты для дальнейших исследований. А также в процессе его создания было показано что только для 60% выбранных объектов спектры космического аппарата ISO из популярного атласа Sloan et al. 2003 [11] можно использовать без перекалибровки. Это поможет избежать в будущем большого количества ошибок, особенно при автоматической, массовой обработке данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Созданный прибор позволяет проводить наблюдения в среднем инфракрасном диапазоне. Предельные звездные величины при высоком качестве изображения и подкупольной температуре вблизи 0°C составляют 9^m в диапазоне L и 8^m в диапазоне M.
2. Шумовые ограничения при наблюдениях слабых объектов на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ в среднем инфракрасном диапазоне с применением коммерческих детекторов определяются фоновым излучением, а не шумовыми характеристиками детектора.
3. Пылевые оболочки звезд T Dra, IRAS 02143+5852 и V Cyg имеют следующие значения внутреннего радиуса оболочки R_{in} , полной оптической толщи в фильтре V τ_V , скорости потери массы звездой dM/dt . T Dra: $R_{in} = 5 - 6$ а.е., $\tau_V = 3.5$, $dM/dt = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ M}_{\odot}/\text{год}$, IRAS02143+5852: $R_{in} = 2.5$ а.е., $\tau_V = 1.8$, $dM/dt = 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ M}_{\odot}/\text{год}$, V Cyg: $R_{in} = 11$ а.е., $\tau_V = 3.6$, $dM/dt = 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ M}_{\odot}/\text{год}$. Температура центральной звезды T Dra $T_{eff} = 2400 \text{ K}$, V Cyg — $T_{eff} = 2600 \text{ K}$.
4. Созданный в работе каталог спектральных распределений энергии для 236 звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции, содержит сведения о распределении энергии в спектре, величину болометрического потока, оценку светимости и может быть использован для моделирования пылевых оболочек звезд, позволяя выбрать актуальные объекты для дальнейших наблюдений.

Личный вклад автора

В статьях 1 (личный вклад 75%), 2 (личный вклад 75%), 4 (личный вклад 75%) автор является первым автором и выполнил большую часть работы. В статье 3 (личный вклад 30%) автор выполнил разработку большей части используемого для обработки получаемых с прибора данных программного обеспечения, а также проводил необходимые для выполнения работы наблюдения. В статьях 5 (личный вклад 40%), 6 (личный вклад 15%) автор выполнил моделирование пылевой оболочки, получил окончательные параметры оболочки и выполнил оценку погрешностей этих параметров, и также проводил необходимые для выполнения работы наблюдения. В статье 7 (личный вклад 40%) автор также разработал все программное обеспечение для автоматического и полуавтоматического сбора и обработки данных, публикации результатов, участвовал в ручной коррекции сглаженных SED объектов.

Степень достоверности результатов

Моделирование пылевых оболочек выполнялось с помощью общепринятого программного пакета RADMC-3D. Многие используемые наблюдательные результаты получены на наземных и космических инструментах, широко используемых научным сообществом. Сами результаты согласуются с результатами

других авторов, полученными для аналогичных объектов. Результаты, касающиеся оборудования получены с помощью непосредственных экспериментов с этим оборудованием.

Апробация работы

1. XIII съезд Международной общественной организации «Астрономическое общество», устный доклад «Характеризация спектрального режима камеры ASTRONIRCAM», ИНАСАН, 24.10.2018.
2. Всероссийская конференция с международным участием «Физика звезд: теория и наблюдения», устный доклад. Моделирование пылевой оболочки углеродной звезды V Cyg», ГАИШ МГУ, 28.06.2023.
3. Всероссийская конференция «Современные инструменты и методы в астрономии», устный доклад «Система гибкого планирования наблюдений на 2.5-м телескопе ГАИШ», САО РАН, 06.09.2023.
4. Всероссийская конференция «Современные инструменты и методы в астрономии», соавтор устного доклада «Камеры ближнего и среднего инфракрасного диапазона 2.5-м телескопа ГАИШ», САО РАН, 06.09.2023
5. Всероссийская астрономическая конференция 2024, постерный доклад «Новая камера среднего инфракрасного диапазона КГО ГАИШ МГУ», САО РАН, 27.08.2024

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 134 страницы, включая 59 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 75 наименований.

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

В **Главе 1** описывается созданный в процессе работы инфракрасный фотометр LM диапазона (3-5 мкм). Проведен анализ возможности наблюдений в LM диапазоне с использованием коммерческих детекторов, выполнены оценки шумов от разных источников. Выполнены расчеты мощности излучения от теплового излучения телескопа, фильтров, фона неба. Полученные значения сравнены с собственными шумами детектора. Рассчитан вклад всех этих величин в общие шумовые параметры системы, в зависимости от внешних условий, и, в первую, очередь, окружающей температуры. Показано, что в случае наблюдений на 2.5 метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ наибольший вклад в

шумы дает именно тепловое излучение конструкций телескопа и камеры (фотометрических фильтров). Рассчитаны предельные звездные величины прибора, в зависимости от внешних условий. Так, например, при наблюдении зимой ($T = -20^{\circ}\text{C}$), предельные величины оказываются на $2\text{--}3^m$ слабее, чем при наблюдениях летом ($T = +20^{\circ}\text{C}$). Показано, что измеренные предельные звездные величины согласуются с теоретически расчетными. Измеренные предельные звездные величины, достигаемые с фотометром на 2.5м телескопе КГО ГАИШ МГУ, составляют примерно 9^m в полосе L, и 8^m в полосе M, при подкупольной температуре вблизи 0°C .

Далее в этой главе описывается конструкция камеры. Основой фотометра является светочувствительный модуль Gavin-615A с матрицей из HgCdTe формата 640×512 пикселей в качестве детектора изображения, охлаждаемой до $\approx 82\text{ K}$ машиной Стирлинга. На данном этапе мы ограничились конструкцией прибора без криостата, с одним дополнительным элементом – сменным фотометрическим фильтром. Относительное отверстие 2.5-м телескопа КГО $A = 1/8$, что дает небольшие углы схождения лучей и позволяет интерференционным фильтрам работать в сходящемся пучке без заметного изменения полосы пропускания. Далее представлены результаты тестирования готового прибора. Определены параметры детектора, такие как темновой ток ($DC = 17.8 \pm 2.2\text{ ADU/мс}$), шум считывания ($RN = 2.3 \pm 0.6\text{ ADU}$), коэффициент преобразования ($GAIN = 520 \pm 9\text{ e}^-/\text{ADU}$), величина подложки ($BIAS = 960.5 \pm 2.2\text{ ADU}$) и нелинейность (меньше 5%). Также в главе описано программное обеспечение, написанное для этого прибора и снимки «первого света».

В **Главе 2** описываются реализованные алгоритмы обработки данных, получаемых на приборе ASTRONIRCAM. Камера оснащена детектором Hawaii-2RG и работает в диапазоне длин волн от 1 до 2.5 мкм. Камера может работать в двух режимах – фотометрическом (получение прямых снимков неба в фильтрах JHK фотометрической системы MKO и нескольких узкополосных фильтрах) и спектральном (получение спектров низкого разрешения). Спектральный режим в свою очередь делится на наблюдения с длинной щелью и наблюдения с короткой щелью в режиме кроссдисперсии. В главе описана последовательность и алгоритмы редукции получаемых изображений, которые реализованы в «пай-плане» программ на языке питон.

Общим этапом для всех данных является коррекция за нелинейность. Вместе с ней производится восстановление данных из пересвеченных пикселей и коррекции космических лучей, так как эти алгоритмы требуют анализа не только результирующего кадра, но и всех полученных неразрушающих считываний детектора за время экспозиции. Так же для всех обрабатываемых кадров выполняется коррекция персистенции (послесвечения). Далее идет разделение на фотометрическую и спектральную часть редукции. В целом, спектральная редукция состоит в коррекции геометрических искажений в спектре, учете спектральных плоских полей и создании дисперсионной кривой. Для фотометрии при наличии вычитается фон неба и производится деление на плоское поле.

В этой главе описаны результаты характеризации спектрального режима ASTRONIRCAM. Определена эффективность прибора в спектральной режиме и его механическая стабильность. Показана, что эффективность мала (от 1% в режиме кроссдисперсии в полосе Y до 14% в режиме длинной щели в полосе K) из-за низкой эффективности гризм и большого количества рассеянного в них света.

В **Главе 3** описываются выполненные нами наблюдения, необходимые для дальнейшей работы по исследованию околозвездных оболочек. Приведены результаты первых наших астрономических наблюдений в среднем инфракрасном диапазоне. Рассматриваются методики, использованные при проведении наблюдений, включая выбор фильтров и настройки экспозиции. Получен и описан оптимальный алгоритм наблюдений (с дизерингом для вычитания фона) на фотометре среднего инфракрасного диапазона на неспециализированном оптическом телескопе, которым и является 2.5м телескоп КГО ГАИШ МГУ. Полный цикл измерений одного объекта во всех фильтрах составляет примерно 5-7 минут. Серьезные накладные расходы создает резкое радиационное охлаждение фильтров, сразу после их переключения. С имеющейся частотой дизеринга нам необходимо дожидаться некоторой стабилизации температуры, чтобы снизить скорость изменения фона. Описываются спектральные наблюдения в ближнем инфракрасном диапазоне, приведены таблицы для некоторых выполненных измерений.

Также в этой главе обсуждается выполненная реализация системы гидирования на 2.5-м телескопе. Ее необходимо использовать, так как время накопления родного объекта при спектральных может достигать до нескольких часов. Система представляет собой оптическую CMOS-камеру небольшого формата, установленную в фокальной плоскости телескопа на подвижном держателе, внутри которого установлена система отдельной фокусировки автогида. В главе рассмотрены структура необходимого для гидирования программного обеспечения, методики определения центра звезд (сильно неправильной формы из-за наблюдения внеосевых изображений) на кадре автогида и выбора оптимальной для гидирования экспозиции.

В **Главе 4** описывается процесс моделирование SED и пылевых оболочек звезд. Для построения распределения энергии в спектре звезд мы используем следующие данные: спектры космической обсерватории ISO [12] и инфракрасного спутника IRAS [13], фотометрические оценки блеска из IRAS, обзора 2MASS [14], спутников AKARI [15], WISE [16], MSX [17], космической обсерватории GAIA [18] [19], каталога Tycho-2 [20], базы данных наблюдений переменных звезд AAVSO, и других. Кроме того, мы использовали собственные наблюдения, полученные в КГО ГАИШ МГУ и КАС ГАИШ МГУ. Полученное распределение энергии корректируется за межзвездное поглощение в соответствии с картой поглощения Green et al. 2019 [21] и законом межзвездного покраснения из Cardelli et al. 1989 [22]. Расстояния до звезды используется из каталога расстояний на основе Gaia EDR3 [19].

Для моделирования излучения пылевой оболочки нами используется пакет RADMC-3D [23]. Вычисления проводятся с учетом многократного рассеяния света на пыли. Учет рассеяния повышает поток в оптической части спектра, и почти не затрагивает поток на длине волны больше 2 микрон. Обычно зафиксированы такие параметры модели, как сферически симметричная форма оболочки, закон изменения плотности вещества в оболочке $n(r) \sim 1/r^2$ и светимость звезды, получаемая нами из данных о SED. Такой закон изменения плотности соответствует равномерному во времени сбросу вещества звездой. Светимость же фиксируется, так как это наиболее точно получаемый (с помощью интегрирования SED) параметр.

Также в главе описаны результаты сбора данных о SED и его моделирования для конкретных звезд: T Dra, IRAS02143+5852 и V Cyg. Для этих звезд моделирование производилось в максимуме блеска. При моделировании исследуется инфракрасный спектр объекта, что позволяет определить количественное содержание разного типа пылевых частиц в оболочке. Приведены полученные параметры пылевых оболочек, такие как размер, плотность, оптическая толщина и другие. Рассчитаны полные массы оболочек и их светимости.

В Главе 5 описывается созданный нами каталог SED звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции. Каталог размещен на сайте группы ИК-астрономии ГАИШ МГУ: https://infra.sai.msu.ru/sai_iss_sed. Он содержит 263 объекта: 63 мириды и AGB звезды, 56 углеродных звезд, 48 post-AGB звезд и 96 объектов других типов (S звезды, протопланетарные туманности, долгопериодические переменные, красные сверхгиганты и др.). Отметим, что при подсчете звезд разных типов и при указании типа в каталоге использовалась классификация SIMBAD. Каждому объекту в каталоге соответствует запись, содержащая 15 полей. Это стандартные поля с именем звезды, координатами и блеском и поля с компилированным и интерполированным SED (в виде текстовых таблиц, рисунков и машиночитаемых данных). Основой каталога является список объектов, для которых существуют спектры ISO [24] SWS [25] в диапазоне от 2.36 до 45 мкм. Из этого списка мы и выбрали интересующие нас типы объектов.

Но только спектров ISO недостаточно для построения информативного распределения энергии в спектре (SED) звезды. Поэтому нами были использованы и другие источники данных. Информацию о фотометрии и спектры ISO SWS и CASSIS [26] мы собирали с помощью несколько измененного нами кода sedbys [27], созданного для компиляции SED молодых звезд. Он использует как общие каталоги 2MASS [14], AKARI [15], GALEX [28], Gaia [18], Tycho-2 [20], IRAS [13], JCMT [29], APASS [30], MSX6C [17], SDSS [31], SPITZER [32], WISE [16], XMMOM [33], так и каталоги наблюдений молодых объектов. Мы исключили обращение к последним, дополнив код обращением к каталогу спектров ISO LWS (данные с длинноволнового спектрографа обсерватории, работавшего в диапазоне 43 – 197 мкм) и приведением данных к единым единицам измерения. На основе собранных данных мы рассчитали светимости отобранных объектов и создали интерполированные SED. В процессе анализа собранных данных нами

было показано, что только для 60% объектов спектры ISO в популярном атласе Sloan et al. 2003 [11] можно использовать без перекалибровки. Также были выбраны объекты для дальнейших наблюдений в нашей обсерватории в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. **С. Г. Желтоухов**, А. М. Татарников, и Н. И. Шатский. Спектральный режим камеры Astronircam. Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика, том 46, № 3, стр. 201–211, 2020. Импакт фактор РИНЦ 1.014. Личный вклад 75%. Объем 1.32 печатных листа.
S. G. Zheltoukhov, A. M. Tatarnikov, and N. I. Shatsky. Characterization of the Astronircam spectral mode. Astronomy Letters, vol. 46, No. 3, pp. 193–203, 2020. Web of science JCI=0.23. Личный вклад 75%. Объем 1.32 печатных листа.
2. **С. Г. Желтоухов** и А. М. Татарников. Об эффективности наблюдений в среднем инфракрасном диапазоне длин волн на 2.5-метровом телескопе КГО МГУ с коммерческими ИК-камерами. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, № 6, стр. 57–65, 2022. Импакт фактор РИНЦ 0.514. Личный вклад 75%. Объем 1.08 печатных листа.
S. G. Zheltoukhov and A. M. Tatarnikov. On the effectiveness of observations in the mid-infrared wavelength range on the 2.5-meter telescope of the Caucasus Mountain Observatory of Moscow State University with commercial IR cameras. Moscow University Physics Bulletin, vol. 77, No. 6, pp. 886–895, 2022. Web of science JCI=0.10. Личный вклад 75%. Объем 1.2 печатных листа.
3. А. М. Татарников, **С. Г. Желтоухов**, Н. И. Шатский, М. А. Бурлак, Н. А. Масленникова, и А. А. Вахонин. Фотометрический режим камеры Astronircam. Астрофизический бюллетень, том 78, № 3, стр. 402–413, 2023. Импакт фактор РИНЦ 1.195. Личный вклад 30%. Объем 1.44 печатных листа.
А. М. Tatarnikov, **S. G. Zheltoukhov**, N. I. Shatsky, M. A. Burlak, N. A. Maslennikova, and A. A. Vakhonin. Photometric operation mode of the Astronircam camera. Astrophysical Bulletin, vol. 78, No. 3, pp. 384–394, 2023. Web of science JCI=0.25. Личный вклад 30%. Объем 1.32 печатных листа.
4. **С. Г. Желтоухов**, А. М. Татарников, А. А. Белякова, и Е. А. Кокшарова. Новая инфракрасная камера Кавказской Горной Обсерватории

ГАИШ МГУ: конструкция, основные параметры и первый свет. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, № 1, стр. 2410801, 2024. Импакт фактор РИНЦ 0.514. Личный вклад 75%. Объем 1.2 печатных листа.

S. G. Zheltoukhov, A. M. Tatarnikov, A. A. Belyakova, and E. A. Koksharova. New infrared camera of the Caucasian Mountain Observatory of the SAI MSU: Design, main parameters, and first light. Moscow University Physics Bulletin, vol. 79, No. 1, pp. 97–106, 2024. Web of science JCI=0.10. Личный вклад 75%. Объем 1.2 печатных листа.

5. А. М. Татарников, **С. Г. Желтоухов**, В. И. Шенаврн, И. В. Сергееenkova, и А. А. Вахонин. Исследование углеродной звезды Т Дракона. Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика, выходные данные отсутствуют. Импакт фактор РИНЦ 1.014. Личный вклад 40%. Объем 1.01 печатных листа.

A. M. Tatarnikov, **S. G. Zheltoukhov**, V. I. Shenavrin, I. V. Sergeenkova, and A. A. Vakhonin. Study of the carbon star T Draconis. Astronomy Letters, vol. 50, No. 1, pp. 51–63, 2024. Web of science JCI=0.23. Личный вклад 40%. Объем 1.01 печатных листа.

6. N. P. Ikonnikova, M. A. Burlak, A. V. Dodin, S. Yu Shugarov, A. A. Belinski, A. A. Fedoteva, A. M. Tatarnikov, R. J. Rudy, R. B. Perry, **S. G. Zheltoukhov**, and K. E. Atapin. Post-agb candidate IRAS 02143+5852: Cepheid-like variability, three-layer circumstellar dust envelope and spectral features. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 530, pp. 1328–1346, 2024. Web of science JCI=1.06. Личный вклад 15%. Объем 2.28 печатных листа.

7. А. М. Татарников, **С. Г. Желтоухов**, и Е. Д. Малик. Распределение энергии в спектрах звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, том 79, № 3, стр. 2430801, 2024. Импакт фактор РИНЦ 0.514. Личный вклад 40%. Объем 0.96 печатных листа.

A. M. Tatarnikov, **S. G. Zheltoukhov**, and E. D. Malik. Spectral energy distribution of late stage stars. Moscow University Physics Bulletin, vol. 79, No. 3, 385–392, 2024. Web of science JCI=0.10. Личный вклад 40%. Объем 0.96 печатных листа.

Список литературы

1. *Shenavrin, V. I.* Search for and study of hot circumstellar dust envelopes / V. I. Shenavrin, O. G. Taranova, A. E. Nadzhip // Astronomy Reports. — 2011. — Янв. — Т. 55, № 1. — С. 31–81.
2. The Caucasian Mountain Observatory of the Sternberg Astronomical Institute: First Six Years of Operation / N. Shatsky [и др.] // Ground-Based Astronomy

- in Russia. 21st Century / под ред. I. I. Romanyuk [и др.]. — 12.2020. — С. 127—132. — arXiv: [2010.10850](https://arxiv.org/abs/2010.10850) [[astro-ph.IM](#)].
3. ASTRONIRCAM—the infrared camera-spectrograph for the 2.5-m telescope of SAI Caucasian observatory / A. E. Nadjip [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2017. — Июль. — Т. 72, № 3. — С. 349—362. — arXiv: [1706.08959](https://arxiv.org/abs/1706.08959) [[astro-ph.IM](#)].
 4. Night-sky brightness and extinction at Mt Shatdzhatmaz / V. Kornilov [и др.] // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 2016. — Нояб. — Т. 462, № 4. — С. 4464—4472. — arXiv: [1607.07637](https://arxiv.org/abs/1607.07637) [[astro-ph.IM](#)].
 5. Study on Atmospheric Optical Turbulence above Mount Shatdzhatmaz in 2007-2013 / V. Kornilov [и др.] // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. — 2014. — Май. — Т. 126, № 939. — С. 482. — arXiv: [1403.6820](https://arxiv.org/abs/1403.6820) [[astro-ph.IM](#)].
 6. The Brightness of the Sky of the Caucasian Mountain Observatory of MSU in the Near Infrared / A. M. Tatarnikov [и др.] // *Astronomy Reports*. — 2024. — Май. — Т. 68, № 1. — С. 67—79.
 7. *Herwig, F.* Evolution of Asymptotic Giant Branch Stars / F. Herwig // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* — 2005. — Сент. — Т. 43, № 1. — С. 435—479.
 8. *Höfner, S.* Mass loss of stars on the asymptotic giant branch. Mechanisms, models and measurements / S. Höfner, H. Olofsson // *Astron. and Astrophys.* — 2018. — Янв. — Т. 26, № 1. — С. 1.
 9. *Simons, D. A.* The Mauna Kea Observatories Near-Infrared Filter Set. I. Defining Optimal 1-5 Micron Bandpasses / D. A. Simons, A. Tokunaga // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. — 2002. — Февр. — Т. 114, № 792. — С. 169—179. — arXiv: [astro-ph/0110594](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0110594) [[astro-ph](#)].
 10. *Leach, R. W.* CCD and IR array controllers / R. W. Leach, F. J. Low // *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*. Т. 4008 / под ред. M. Iye, A. F. Moorwood. — 08.2000. — С. 337—343. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
 11. A Uniform Database of 2.4-45.4 Micron Spectra from the Infrared Space Observatory Short Wavelength Spectrometer / G. C. Sloan [и др.] // *Astrophys. J. Suppl.* — 2003. — Авг. — Т. 147, № 2. — С. 379—401.
 12. A Uniform Database of 2.4-45.4 Micron Spectra from the Infrared Space Observatory Short Wavelength Spectrometer / G. C. Sloan [и др.] // *Astrophys. J. Suppl.* — 2003. — Авг. — Т. 147, № 2. — С. 379—401.
 13. The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission. / G. Neugebauer [и др.] // *Astrophys. J.* — 1984. — Март. — Т. 278. — С. L1—L6.
 14. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) / M. F. Skrutskie [и др.] // *Astron. J.* — 2006. — Февр. — Т. 131, № 2. — С. 1163—1183.

15. The AKARI/IRC mid-infrared all-sky survey / D. Ishihara [и др.] // Astron. and Astrophys. — 2010. — Май. — Т. 514. — A1. — arXiv: [1003.0270 \[astro-ph.IM\]](#).
16. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance / E. L. Wright [и др.] // Astron. J. — 2010. — Дек. — Т. 140, № 6. — С. 1868—1881. — arXiv: [1008.0031 \[astro-ph.IM\]](#).
17. VizieR Online Data Catalog: MSX6C Infrared Point Source Catalog. The Midcourse Space Experiment Point Source Catalog Version 2.3 (October 2003) / M. P. Egan [и др.] // VizieR Online Data Catalog. — 2003. — Янв. — С. V/114.
18. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties / Gaia Collaboration [и др.] // Astron. and Astrophys. — 2018. — Авг. — Т. 616. — A1. — arXiv: [1804.09365 \[astro-ph.GA\]](#).
19. Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties / Gaia Collaboration [и др.] // Astron. and Astrophys. — 2021. — Май. — Т. 649. — A1. — arXiv: [2012.01533 \[astro-ph.GA\]](#).
20. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars / E. Høg [и др.] // Astron. and Astrophys. — 2000. — Март. — Т. 355. — С. L27—L30.
21. A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS / G. M. Green [и др.] // Astrophys. J. — 2019. — Дек. — Т. 887, № 1. — С. 93. — arXiv: [1905.02734 \[astro-ph.GA\]](#).
22. *Cardelli, J. A.* The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction / J. A. Cardelli, G. C. Clayton, J. S. Mathis // Astrophys. J. — 1989. — Окт. — Т. 345. — С. 245.
23. RADMC-3D: A multi-purpose radiative transfer tool / C. P. Dullemond [и др.]. — 2012. — Февр. — ascl: [1202.015](#).
24. The Infrared Space Observatory (ISO) mission. / M. F. Kessler [и др.] // Astron. and Astrophys. — 1996. — Нояб. — Т. 315, № 2. — С. L27—L31.
25. Observing with the ISO Short-Wavelength Spectrometer. / T. de Graauw [и др.] // Astron. and Astrophys. — 1996. — Нояб. — Т. 315. — С. L49—L54.
26. CASSIS: The Cornell Atlas of Spitzer/Infrared Spectrograph Sources / V. Leboutteiller [и др.] // Astrophys. J. Suppl. — 2011. — Сент. — Т. 196, № 1. — С. 8. — arXiv: [1108.3507 \[astro-ph.IM\]](#).
27. *Davies, C. L.* SEDBYS: A python-based SED Builder for Young Stars / C. L. Davies // SoftwareX. — 2021. — Июнь. — Т. 14. — С. 100687. — arXiv: [2008.07800 \[astro-ph.SR\]](#).
28. GALEX catalogs of UV sources: statistical properties and sample science applications: hot white dwarfs in the Milky Way / L. Bianchi [и др.] // Astrophys. and Space Sci. — 2011. — Сент. — Т. 335, № 1. — С. 161—169.

29. The SCUBA Legacy Catalogues: Submillimeter-Continuum Objects Detected by SCUBA / J. Di Francesco [и др.] // *Astrophys. J. Suppl.* — 2008. — Март. — Т. 175, № 1. — С. 277—295. — arXiv: [0801.2595 \[astro-ph\]](#).
30. APASS - The Latest Data Release / A. A. Henden [и др.] // *American Astronomical Society Meeting Abstracts #225*. Т. 225. — 01.2015. — С. 336.16. — (American Astronomical Society Meeting Abstracts).
31. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey / K. N. Abazajian [и др.] // *Astrophys. J. Suppl.* — 2009. — Июнь. — Т. 182, № 2. — С. 543—558. — arXiv: [0812.0649 \[astro-ph\]](#).
32. The Spitzer Space Telescope Mission / M. W. Werner [и др.] // *Astrophys. J. Suppl.* — 2004. — Сент. — Т. 154, № 1. — С. 1—9. — arXiv: [astro-ph/0406223 \[astro-ph\]](#).
33. The XMM-Newton serendipitous ultraviolet source survey catalogue / M. J. Page [и др.] // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* — 2012. — Окт. — Т. 426, № 2. — С. 903—926. — arXiv: [1207.5182 \[astro-ph.CO\]](#).