

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации
AAAA-A20-120012990080-2

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ г.

УДК
524.35 Сверхновые звезды и связанные с ними объекты. Пекулярные
звезды
524.3 Звезды
524.5 Межзвездная среда. Туманности (галактические)

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Галактическая астрономия. Физика межзвездной среды
по теме:
Сверхновые, массивные звезды и их взаимодействие с окружающей средой
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ г.

Руководитель темы
Егоров О.В.

«__» _____ г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:
старший научный сотрудник _____ (Егоров О.В.)
ник, кандидат физико-
математических наук

Исполнители темы:
ведущий специалист _____ (Васильев К.И.)
ведущий научный сотрудник _____ (Гварамадзе В.В.)
ник, кандидат физико-
математических наук
инженер 2-ой категории _____ (Герасимов И.С.)
ведущий научный со-
трудник, доктор физико-
математических наук, про-
фессор по специальности _____ (Лозинская Т.А.)
инженер 1-ой категории, кан-
дидат физико-математических
наук _____ (Марьева О.В.)
старший научный сотруд-
ник, кандидат физико-
математических наук _____ (Ситник Т.Г.)
ведущий специалист _____ (Ярлова А.Д.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

сверхновые звёзды, звёздный ветер, межзвёздная и околозвездная среда, молекулярные облака, массивные звезды, газопылевые оболочки, области h ii

Ключевые слова по-английски:

supernova stars, stellar wind, gas-dust shells, molecular clouds, h ii regions, interstellar and circumstellar medium, massive stars

Ионизирующее излучение массивных звезд, их звездный ветер и последующие взрывы сверхновых существенным образом регулируют структуру, динамику и химический состав межзвездной среды. Это действие проявляется на различных пространственных и временных масштабах: от индивидуальных кольцевых туманностей, околозвездных оболочек и областей HII вокруг молодых массивных звезд, до гигантских сверхоболочек ионизованного и нейтрального газа, размером до 2-3 килопарсек. Целью НИР является исследование вышеупомянутых объектов и процессов взаимодействия массивных звезд и межзвездной среды. Исследование опирается на данные собственных спектральных и фотометрических наблюдений на крупных российских и зарубежных телескопах. В частности, важной частью исследований является панорамная спектроскопия изучаемых объектов с интерферометром Фабри-Перо и с классическими спектрографами интегрального поля. Исследования частично основаны на архивных наблюдательных данных наземных и космических телескопов в широком диапазоне энергий (HST, ALMA, VLA, GALEX, Spitzer, WISE и др.), а выполняемый анализ данных опирается на результаты численного моделирования, проводимого как в рамках настоящей НИР (с помощью фотоионизационного кода Cloudy), так и имеющихся в литературе. В отчетном году были получены следующие результаты: Показано, что звездообразование в карликовой галактике DDO 53 вероятно было инициировано захватом облака атомарного водорода из межгалактической среды. С этим же процессом связаны обнаруженные признаки ударных волн в межзвездной среде. В DDO 53 также выявлены 6 расширяющихся локальных сверхоболочек и широкомасштабное истечение ионизованного газа под действием притока энергии от массивных звезд. Предложен и протестирован новый метод оценки скоростей расширения сверхоболочек при их наблюдениях с недостаточным угловым разрешением по ширине эмиссионных линий в их интегральных спектрах. Создана база данных наблюдений с интерферометром Фабри-Перо на 6-м телескопе БТА для областей звездообразования нескольких десятков близких карликовых галактик. В рамках международного сотрудничества с коллаборацией PHANGS, опубликованы данные наблюдений на телескопах ALMA, HST, VLA и результаты их первичного анализа для нескольких десятков близких спиральных галактик со звездообразованием. Исследованы параметры ионизованного газа в примерно 6000 областях HII и показано, что почти всегда внутреннее давление в них, поддерживаемое притоком энергии от массивных звезд, превышает внешнее давление межзвездной среды. Исследованы несколько Ве звезд и окружающая их межзвездная среда - выявлено несколько объектов с пекулярностями в их спектрах, связанными с формированием око-

лозвездных дисков, быстрым вращением или взаимодействием с рентгеновским компаньоном.

Полученные результаты найдут применение в дальнейших исследованиях: (а) процессов звездообразования в галактиках, (б) эволюции массивных звезд и их взаимодействия с окружающей средой. (в) эволюции газовых сверхоболочек под действием звездообразования внутри и в их стенках

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем отчете НИР применяются следующие сокращения: СН: сверхновая; ГСО: гигантская сверхоболочка; ЗО: звездообразование; МЗС: межзвездная среда; LBV: голубые переменные высокой светимости; ИК: инфракрасный; УФ: ультрафиолетовый; ИФП: сканирующий интерферометр Фабри-Перо.

Исследование взаимодействия звездного ветра, ионизирующего излучения и сверхновых с окружающей межзвездной средой - одна из важнейших задач современной астрофизики. Значительная часть массы звезд класса О и В теряется в ходе эволюции в форме звездного ветра и в результате сброса вещества в виде оболочки. Свойства окружающей их межзвездной среды (структура, кинематика, химический состав) во многом регулируются действием звездного ветра и сверхновых. Коллективное действие ветра и сверхновых от множества звезд в скоплениях приводит к формированию протяженных оболочечных структур, размер которых зачастую превышает толщину диска галактик. Это приводит к перераспределению продуктов нуклеосинтеза в межзвездной среде галактики, регулирует процессы звездообразования и, следовательно, эволюцию галактик.

Исследование межзвездной среды вокруг массивных звезд является важным инструментом для изучения их свойств на поздних стадиях эволюции. Компактные околозвездные структуры вокруг массивных звезд являются непосредственным результатом их воздействия на межзвездную среду. Обнаружение таких структур с помощью современных космических ИК-обсерваторий (Spitzer, Herschel, WISE) является эффективным методом поиска редких массивных звезд на поздних этапах их эволюции (Вольфа-Райе, LBV). Анализ кинематики ионизованного газа вокруг таких объектов также показал свою высокую эффективность для их обнаружения. При этом наблюдаемые свойства выметенных оболочек вокруг таких массивных звезд определяются во многом свойствами и эволюционным статусом центрального объекта.

Анализ свойств межзвездной среды в областях звездообразования на масштабах десятков - сотен парсек необходим для понимания процессов регулирования звездообразования в галактиках и их эволюции в целом. Приток энергии от множества массивных звезд формирует сверхоболочки и ГСО ионизованного и нейтрального газа в межзвездной среде галактик. Наблюдения близких галактик позволили выделить несколько тысяч ГСО в них размером до 1–3 кпк и возрастом 10–200 млн лет. Во многих галактиках очаги современного ЗО, наблюдаемые как яркие области ионизованного газа, локализованы преимущественно в плотных стенках ГСО. Механизмы, инициирующие вспышки ЗО в стенках ГСО, а также эволюция ГСО под действием притока энергии от массивных звезд в их стенках, все еще не до конца ясны и требуют исследования.

Оптимальными объектами для исследования природы ГСО и механизмов распространения ЗО в галактиках являются близкие иррегулярные галактики, что обусловлено рядом факторов: 1. Твердотельное вращение большей части диска HI (ГСО не разрушаются дифференциальным вращением). 2. Цикл взаимодействия звезд и газа не прерывается спиральными волнами. 3. Толщина газового слоя больше, а плотность газа меньше, чем в спиральных галактиках. Соответственно тот же приток энергии, что и в спиральных

галактиках, формирует здесь ГСО большего размера, которые позднее прорываются в корону галактики. В то же время близкие спиральные галактики предоставляют возможность изучать менее протяженные и более молодые газовые сверхоболочки в более широком диапазоне металличностей, плотностей, а также в различных окружениях.

В цели и задачи работы в отчетном году входили следующие исследования: 1. Исследование областей звездообразования в близких карликовых галактиках со звездообразованием, включая две галактики с ГСО (Sextans A и NGC 4068), а также близкую галактику DDO 53. Проведение наблюдений на крупных российских телескопах (6-м БТА САО РАН и 2.5-м КГО ГАИШ МГУ). Выводы о природе звездообразования и роли массивных звезд в морфологии и кинематике газа в галактике DDO 53. Предварительные выводы о состоянии ионизации газа в стенках и внутри ГСО Sextans A, проверка нескольких сценариев формирования эмиссионного спектра в обнаруженном ранее звездном объекте на севере галактики NGC 4068. 2. Разработка метода, применимого для оценки скоростей расширения сверхоболочек ионизованного газа, наблюдаемых с недостаточным угловым разрешением (например, в галактиках за пределами Местной группы) 3. Создание ресурса, содержащего результаты наблюдений близких карликовых галактик со звездообразованием на 6-м телескопе БТА с ИФП высокого разрешения за последние 20 лет. 4. Работа по первичному анализу и подготовке к публикации данных наблюдений областей звездообразования в нескольких десятках близких спиральных галактик на телескопах ALMA, HST и VLT, полученных в коллаборации PHANGS. 5. Статистический анализ свойств ионизованного газа внутри областей HII в близких галактиках по данным наблюдений близких спиральных галактик с панорамным спектрографом MUSE на 8-м телескопе VLT. 6. Наблюдательное изучение выборки Be звезд, их компаньонов и окружающей газо-пылевой среды. Поиск особенностей в их спектрах, указывающих на процесс формирования и свойства околозвездных дисков вокруг них.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Выполнено исследование МЗС в областях звездообразования в близкой карликовой галактике DDO 53. Галактика DDO 53 находится на периферии группы М81 на расстоянии около 4 Мпк и является отличной лабораторией для изучения процессов взаимодействия массивных звезд и межзвездной среды в условиях пониженной металличности и в изолированном окружении. Анализ длиннощелевых спектров, полученных нами на 6-м телескопе БТА САО РАН, показал, что металличность газа в галактике (характеризуемая относительным содержанием кислорода в МЗС) $12 + \log(O/H) \sim 7.65$, то есть около 10% от солнечной. В таких условиях ожидается, что мощность ветра массивных звезд будет ниже, чем в более массивных и высокометаллических галактиках. Тем не менее, в DDO 53 мы обнаружили 6 оболочек ионизованного газа, расширяющихся со скоростями порядка 10-20 км/с. Анализ данных ИФП, полученных на телескопе БТА, а также архивных данных с космического телескопа HST, показал, что притока энергии от ветра массивных звезд достаточно для формирования этих структур. Изучение состояния ионизации газа в галактике, выполненное по результатам фотометрических наблюдений в узкополосных фильтрах на БТА, позволило идентифицировать признаки недавних вспышек сверхновых только в двух из исследованных оболочек. Таким образом, было показано, что ветер звезд оказывает доминирующее влияние на МЗС в областях ЗО в этой галактике.

Глубокие изображения в линии H α позволили обнаружить протяженную эмиссию ионизованного газа в форме сверхоболочки, окружающей галактику DDO 53. Показано, что притока энергии массивных звезд в областях звездообразования достаточно для формирования такой структуры. При этом фактор нагрузки наблюдаемого галактического ветра равен 1.25, что согласуется с модельными расчетами из литературы для галактик низких масс, но при этом выше, чем было оценено ранее по наблюдательным данным для нескольких других близких карликовых галактики. С другой стороны, отмечено, что наблюдаемая структура H α может быть связана также с действием утекающих ионизирующих квантов из областей HII на окружающий атомарный водород, что может приводить к завышению фактора нагрузки. Определенная доля утекающих ионизирующих квантов из областей HII согласуется с оценками для других близких карликовых галактик и указывает на возможность такого сценария.

Важным результатом анализа МЗС галактики DDO 53 явилось обнаружение протяженной структуры атомарного водорода во внешних областях галактики, примыкающей к области наиболее интенсивного звездообразования. Эта структура выделяется только на отрицательных лучевых скоростях относительно модели кругового вращения галактики. Исходя из наблюдаемой скорости газа и размера этого облака HI, был оценен необходимый темп звездообразования для формирования такой структуры под действием притока энергии от ветра массивных звезд и СН. Он оказался в несколько раз выше, чем наблюдается в галактике, что не согласуется с предположением о формировании этой структуры HI в результате выброса из области звездообразования. В то же время, получено хорошее согласие с предположением о происходящей аккрецией газового облака из межгалактической среды. Показано, что этот процесс может быть ответственным за недавнюю (около 30 млн. лет назад) вспышку звездообразования в DDO 53. Анализ кинемати-

ки в линии $H\alpha$ в области перекрытия с обсуждаемой протяженной структурой HII показал наличие здесь высокоскоростных движений ионизованного газа, скорость которых совпадает со скоростью атомарного водорода. Используя данные панорамной спектроскопии с 3.5-м телескопа Calar Alto, мы провели анализ условий ионизации газа в этой области и выявили признаки ударных волн. Вероятно, эти ударные волны связаны непосредственно с взаимодействием падающего облака нейтрального водорода и МЗС DDO 53. Таким образом, наши результаты свидетельствуют о происходящей аккреции облака нейтрального водорода на МЗС галактики DDO 53, которая стимулировала вспышку звездообразования в галактике.

Выполнены спектральные наблюдения на 6-м телескопе БТА САО РАН областей $3O$ в карликовой галактике Sextans A, а также ее фотометрические наблюдения с прибором MaNGaL на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Целью наблюдений являлся анализ механизмов возбуждения ионизованного газа в отдельных областях HII , локализованных в стенках ГСО HII и внутри этой ГСО. Ранее нами были обнаружены высокоскоростные движения газа по данным наблюдений с ИФП на БТА в нескольких областях HII в этой галактике. В итоге мы идентифицировали несколько компактных областей, демонстрирующие признаки высвечивания за фронтом ударной волны. Вероятно, наблюдаемые структуры связаны со старыми остатками СН. При этом не выявлено признаков ударного возбуждения или локального обогащения МЗС тяжелыми элементами в непосредственной окрестности O -звезды в юго-западной части галактики, идентифицированной ранее как одной из самых низкометаллических звезд в Местной группе. В то же время анализ полученных ранее данных ИФП указывает на высокую дисперсию скоростей ионизованного газа в МЗС вокруг нее, что может быть связано с действием ветра звезды.

Выполнены фотометрические наблюдения карликовой галактики NGC 4068 в линии $[OIII] 5007 A$ на 6-м телескопе БТА САО РАН, а также длиннополовые наблюдения со спектрографом TDS на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Интересующим объектом наблюдательных исследований являлся компактный объект с необычным эмиссионным спектром в центре ГСО в северной части галактики. Фотометрические наблюдения позволили оценить светимость объекта в линии $[OIII]$ и отвергнуть гипотезу о том, что это - планетарная туманность в условиях низкой металличности (выдвинутую ранее исходя из сходства спектра с планетарной туманностью в галактике Sextans B). Спектральные наблюдения позволили уточнить металличность газа в объекте. Оказалось, что содержание кислорода в МЗС вокруг него не отличается от среднего в галактике, однако обилие азота в несколько раз выше, что явно указывает на произошедший недавний выброс его из звезды. Наши данные выявили слабую переменность спектральных линий. Рассмотрена гипотеза о том, что изучаемый объект является туманностью вокруг массивной низкометаллической звезды Вольфа-Райе. Результаты выполненного моделирования спектра с помощью фотоионизационного кода Cloudy согласуются с ней.

Создана база данных близких галактик со звездообразованием, наблюдавшихся ранее на 6-м телескопе БТА САО РАН с ИФП высокого спектрального разрешения. В выборку вошли около 90 галактик. Для всех этих объектов была проведена обработка данных наблюдений, проводившиеся в прошедшие 20 лет на БТА. В итоге были получены кубы данных в линии $H\alpha$,

на основе которых были построены карты распределения потока в линии $H\alpha$, наблюдаемых лучевых скоростей и дисперсии скоростей. В части галактик были идентифицированы области сверхзвуковых движений ионизованного газа, связанных с расширяющимися оболочками. Для представления результатов обработки и анализа данных был создан сайт проекта SIGMA-FPI: <http://sigma.sai.msu.ru>. В настоящее время на нем выложены данные для около половины объектов, сайт будет пополняться по мере открытия доступа к данным и добавления новых галактик в выборку.

Разработан новый метод оценки скорости расширения сверхоболочек по данным их панорамной спектроскопии при недостаточном угловом разрешении. Для этого исследована аналитическая модель тонкой расширяющейся оболочки в турбулентной МЗС. Анализ модели показал, что дисперсия лучевых скоростей, измеряемая по интегральному спектру оболочки, зависит от трех параметров - заложенной в модель скорости расширения оболочки, средней дисперсии МЗС, связанной с турбулентностью, и с шириной аппаратного контура спектрографа. Показано, что скорость расширения оболочки можно однозначно оценить из наблюдаемой дисперсии скоростей, а также что метод работает с точностью лучше 10% даже в случае больших неоднородностей плотности МЗС. Получено также, что традиционно используемые методы определения скоростей расширения газовых оболочек по спектральным данным (диаграммы «позиция-скорость», декомпозиция профиля линий) работают хорошо только в том случае, когда угловое разрешение составляет не менее 50% размера оболочки, что зачастую не выполняется для галактик за пределами Местной группы. Новый метод применен к данным ИФП для близкой карликовой галактики IC 1613. Определенные скорости расширения двух сверхоболочек в этой галактике хорошо согласуются с оценками, полученными другими методами (с точностью в пределах 3 км/с, лучше 10%). Также впервые определена скорость расширения и кинематический возраст единственного остатка SN в этой галактике. Полученный возраст (3100 лет) хорошо согласуется с независимыми оценками, найденными из рентгеновской светимости остатка SN.

В рамках международного сотрудничества с коллаборацией PHANGS были выполнены работы по первичному анализу и подготовке к публикации наблюдательных данных для областей звездообразования в 90 близких галактик (до 20 Мпк) со звездообразованием в линии CO (наблюдения на телескопе ALMA), 38 галактик в широкополосных фильтрах в оптическом и УФ диапазонах (наблюдения на космическом телескопе HST), а также панорамной оптической спектроскопии 19 галактик выборки со спектрографом MUSE (наблюдения на 8-м телескопе VLT). Эти новые данные впервые позволяют выполнять детальные исследования молекулярного и ионизованного газа и влияющих на него массивных звезд на масштабах отдельных областей HII (50-100 пк) в нескольких тысячах внегалактических областей 30.

По результатам панорамной спектроскопии в рамках обзора PHANGS-MUSE были выполнены исследования параметров ионизованного газа в 5810 HII областей 19 галактик со звездообразованием. Получены оценки электронной плотности, ионизационного параметра, давления ионизованного газа в этих областях. Показано, что суммарное действие турбулентных движений, ионизирующего излучения и ветра массивных звезд создают давление ионизованного газа внутри областей HII значительно превышающее дав-

ление окружающей МЗС. Оказалось, что практически все исследованные области III расширяются под действием притока энергии от звезд внутри них. Исключением явились около 1% областей III, расположенных в основном в центральных частях галактик, где давление газа в окружающей МЗС выше, чем внутри областей III.

Проведена оптическая спектроскопия остатка SN MCSNR J0127-7332 и звезды Be 2dFS 3831, являющейся донором массы, при помощи Южно-Африканского 11-м телескопа SALT. Исследуемая рентгеновская двойная система массивных звезд SXP 1062 находится в Малом Магеллановом Облаке. Измерена скорость расширения остатка SN, оказавшаяся равной 140 км/с, что указывает на то, что MCSNR J0127-7332 находится в радиативной фазе. Оцененный возраст MCSNR J0127-7332 составляет около 10 000 лет. Наблюдаемые отношения линий в остатке SN говорят о том, что окружающая МЗС, вероятно, ионизована звездой 2dFS 3831 или другими OB-звездами вокруг остатка SN. Предполагается, что MCSNR J0127-7332 является результатом взрыва сверхновой внутри массивной оболочки, выметенной ранее ветром звезды на предыдущем этапе эволюции. Обнаружено, что спектр звезды 2dFS 3831 меняется в зависимости от ее орбитальной фазы, что интерпретировано как результат возмущений и нагрева аккреционного диска во время прохождения нейтронной звезды через него.

В рамках исследований массивных звёзд с ИК оболочками на 2-х метровом телескопе Астрономического института Чехии получены спектры высокого ($R=50\,000$) и среднего ($R=15\,000$) разрешения для звезд PY Gem (HD674), BD+43 3710, BD+14 1106 и HD253659. У PYGem и HD253659 виден двухпиковый профиль линии водорода H α , что свидетельствует об их принадлежности к классу быстровращающихся Be звёзд. У BD+43 3710 (B5 I) обнаружена переменность профиля H α . В 2021 году продолжался спектральный мониторинг двойной системы HD7252, у которой ранее нами был обнаружен третий компонент на доплеровских картах. Новые спектры высокого разрешения должны пролить свет на природу третьего компонента.

Наблюдательные исследования еще одной массивной звезды класса Be – 12 Vul (HD187811), показали переменность формы линий водорода в ее спектре, что может быть связано с формированием околосредной оболочки. Также впервые детектирована эмиссия в линии CO, что несвойственно звездам Be, но при этом типично для звезд класса B[e].

Выполнялись исследования звезды MN112, классифицированной как кандидат в LBV. Были получены два новых спектра MN112. Один спектр низкого разрешения получен на телескопе БТА со спектрографом SCORPIO. Второй – среднего разрешения ($R=15\,000$) на 2-х метровом телескопе Астрономического института Чехии. Накопленные с 2009 года, когда объект был включен в список звёзд кандидатов в LBV, спектры позволяют искать спектральную переменность. Однако, по имеющимся данным никакой спектральной переменности за последние 12 лет звезда не показала. Также мы провели анализ фотометрических данных (кривая блеска по данным 4-х летнего обзора ASAS-Ic, архивные фотопластинки с начала 1950-х годов). По собранным данным переменности блеска у звезды также не обнаружено, объект по-прежнему остается кандидатом в LBV.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения НИР получены следующие важные результаты: Исследована межзвездная среда близкой карликовой галактики со звездообразованием DDO 53. Обнаружено 6 расширяющихся сверхоболочек, 4 из которых связаны с действием ветра массивных звезд, а в двух вероятен вклад недавних взрывов сверхновых. На периферии галактики обнаружено протяженное облако атомарного водорода, связанное с областью наиболее интенсивного звездообразования. Показано, что облако падает на галактику, стимулируя CO и вызывая ударные волны. Обнаружена протяженная эмиссия ионизованного газа вокруг галактики – слабый галактический ветер. Его параметры согласуются с результатами численных моделей для галактик подобной массы.

Выполнены наблюдения на телескопах БТА (САО РАН) и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ областей звездообразования в близких карликовых галактиках Sextans A и NGC 4068. С их помощью прояснена природа пекулярного эмиссионного объекта в NGC 4068 и найдены признаки ударного возбуждения газа в нескольких областях Sextans A. Изучение этих объектов будет продолжено в следующем году.

Создан веб-ресурс, на котором выложены результаты обработки данных многолетних наблюдений с ИФП на 6-м телескопе БТА близких галактик со звездообразованием. Там же представлены результаты анализа данных – распределения яркости в линии $\text{H}\alpha$, поля скоростей и дисперсии скоростей газа.

Предложен новый метод оценки скоростей расширяющихся оболочек из наблюдений с недостаточным угловым разрешением. Метод протестирован на модельных и реальных данных, показано хорошее согласие с результатами прямых измерений применительно к близким объектам.

В рамках сотрудничества с международной коллаборацией PHANGS, проведен первичный анализ и опубликованы данные для нескольких десятков близких галактик со звездообразованием в различных диапазонах длин волн по результатам наблюдений на телескопах ALMA, HST, VLT.

Выполнены детальные исследования нескольких массивных звезд и окружающей их МЗС в нашей Галактике и в Малом Магеллановом Облаке. Измерены параметры SN MCSNR J0127-7332 и ее компаньона – звезды Be 2dFS 3831. Обнаружена спектральная переменность звезды Be. Показано, что она может быть связана с прохождением нейтронной звезды через аккреционный диск системы.

Наблюдательные исследования выборки Be звезд показали наличие многокомпонентного профиля линии $\text{H}\alpha$ в некоторых из них, что указывает на их быстрое вращение. В одной из изученных звезд Be – Vul 12, впервые детектирована эмиссия в линии CO , что нетипично для звезд этого класса. Спектральная переменность профиля линии $\text{H}\alpha$ свидетельствует о процессе формирования околозвездной оболочки в ней.

Все запланированные задачи выполнены.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2021 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами