

**«Сверхновые, массивные звезды и их взаимодействие с окружающей средой»
(Итоговый отчет за 2020-2024гг)
Руководитель: Лозинская Т.А.**

1) Участники темы в 2024 году: 3 научных сотрудника и 3 студента/аспиранта

Научные сотрудники:

Лозинская Т.А. (д.ф.-м.н., в.н.с. отдела радиоастрономии) (рук.)
Егоров О.В. (к.ф.-м.н., с.н.с. отдела радиоастрономии)
Ситник Т.Г. (к.ф.-м.н., с.н.с. отдела радиоастрономии)

Студенты/аспиранты:

Васильев К.И. (аспирант, вед.инж. отдела радиоастрономии)
Герасимов И.С. (студент, инж. 2й кат. отдела радиоастрономии)
Ярлова А.Д. (аспирант, вед.инж. отдела радиоастрономии)

Все трое окончили обучение в текущем отчетном году

Изменения состава участников за 2020-2024 году

Руководство: Гварамадзе В.В. (2020), Егоров О.В. (2020-2022), Лозинская Т.А. (2023-2024)
Бывшие участники проекта: Брюхарева Т.С. (2020), Гварамадзе В.В. (2020), Марьева О.В. (2020-2021)

2) Публикации:

Всего опубликовано в 2024 году 2 статьи в реферируемых журналах, обе в Q1 (MNRAS)

За 2020-2024 гг. опубликовано 34 статьи в реферируемых журналах, в том числе 21 в Q1

3) Конференции

В 2024 году результаты работы представлены Герасимовым И.С. и Ярловой А.Д. в виде 2 докладов на всероссийской конференции ВАК-2024 и международной конференции XXXII IAU General Assembly. Всего по результатам проекта было сделано 22 доклада на конференциях.

4) Конкретные исследования и результаты за 2024 год и за 5 лет

В течение 5 лет выполнялись исследования взаимодействия массивных звезд с межзвездной средой (МЗС) на масштабах от 1 пк (окрестности отдельных звезд) до нескольких килопарсек (гигантские сверхоболочки и глобальные структуры в МЗС, формирующиеся под действием энергии нескольких поколений звезд). Целью исследований было изучение механизмов обратной связи между массивными звездами и МЗС и их роли в регулировании морфологии, кинематики, химического состава газа и звездообразования в галактиках. Объектами наблюдательных

исследований при этом являлись области звездообразования в нашей Галактике и в других близких галактиках разных масс. Исследования основывались на оригинальных наблюдениях на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, 6-м телескопе БТА САО РАН, 11-м Южно-африканском телескопе SALT, а также архивных данных и данных, полученных в сотрудничестве с иностранными коллегами на других крупных телескопах (таких как VLT, VLA, Chandra, JWST). Основными методами являлись длиннощелевая и панорамная оптическая спектроскопия и фотометрия в оптическом и ИК диапазонах.

В 2024 году проводились исследования в следующих направлениях:

1) Проведен анализ наблюдательных данных БТА (Scorpio), КГО (NBI) и VLT (MUSE), полученных для карликовой галактики Местной группы IC1613. Ионизованный и нейтральный газ в ярких областях интенсивного звездообразования в этой близкой галактике были детально изучены нами ранее, в том числе на предыдущих этапах выполнения настоящего проекта. На этом этапе интерес представляли слабые эмиссионные туманности в стенках гигантской сверхоболочки нейтрального водорода, размером 1 кпк, за пределами области интенсивного звездообразования. Эти туманности выявлены нами по данным глубоких изображений, полученных на 2.5-м телескопе КГО в эмиссионной линии H α . По результатам выполненной спектроскопии и фотометрии в узкополосных фильтрах показано, что все эти туманности, за исключением одной, демонстрируют фотоионизационный механизм возбуждения и являются областями HII. Показано, что одна из областей является вероятным остатком сверхновой. Исследовав спектрально все кандидаты в звезды Вольфа-Райе в этой галактике, мы не подтвердили ни одного из них, за исключением хорошо известной звезды класса WO. Обнаружены два новых кандидата в звезды LBV. Таким образом, мы показали, что в галактике IC1613 происходит звездообразование на всем протяжении гигантской сверхоболочки нейтрального водорода, а количество WR звезд в галактике существенно меньше, чем считалось ранее. Опубликована статья Yarovova et al. (2024) в MNRAS. Участники: Яророва, Герасимов, Егоров

2) Исследована кинематика ионизованного и нейтрального водорода в карликовой галактике Sextans B методами панорамной (БТА/Scorpio-2/ИФП и VLT/MUSE) и щелевой (КГО/TDS, SALT/RSS) спектроскопии. Показано, что как и в других исследованных в проекте карликовых галактиках, звездообразование в Sextans B происходит в стенке гигантской сверхоболочки, размером порядка 1 кпк. Анализ кинематики ионизованного газа выявил локализованные некруговые движения газа в шести областях, размером менее 200 пк. Показано, что три из них являются молодыми (<1.1 млн лет) оболочками ионизованного газа, расширяющимися со скоростью 25-50 км/с под действием недавних вспышек сверхновых и звездного ветра. Наши измерения демонстрируют, что по крайней мере три области с высокоскоростными некруговыми движениями являются остатками сверхновых. Мы пришли к выводу, что приток энергии от сверхновых оказывает доминирующий вклад в энергетический баланс между массивными звездами и МЗС в Sextans B, что ожидаемо для такой низкой металличности (~ 0.1 солнечной), как в этой галактике. В то же время, учет притока энергии от стадий, предшествующим сверхновым, необходим для объяснения наблюдаемых свойств одной из обнаруженных нами оболочек ионизованного газа.

Результаты опубликованы в статье Gerasimov et al. (2024) в MNRAS. Участники: Герасимов, Егоров, Лозинская

3) Выполнен анализ химического состава, кинематики и условий ионизации в большей части областей HII близкой карликовой галактики NGC2366. Анализ основан на наших данных наблюдений с интерферометром Фабри-Перо (БТА), длинной щелью (БТА) и изображениями в эмиссионных линиях (КГО). Впервые получено распределение содержания кислорода (показателя металличности газа) в областях HII по всему диску галактики. Значимых вариаций металличности не обнаружено, что согласуется с низкой массой галактики. В NGC2366 обнаружено несколько областей с существенными некруговыми движениями. Показано, что одна из них может являться звездой WR. Ранние работы демонстрируют наличие нескольких кандидатов в остатки сверхновых в этой галактике, однако их связь с областями с высокой дисперсией скоростей не очевидна. Подробно изучена область наиболее интенсивного звездообразования (Mrk71), ассоциированная с двумя массивными молодыми сверхскоплениями. В предыдущих работах был показано наличие истечения горячего газа под действием притока механической энергии и ионизирующей радиации от этих скоплений. Согласно нашему анализу кинематики и морфологии ионизованного газа, это истечение, видимое в линиях [OIII], простирается гораздо дальше, чем считалось ранее (на ~ 1 кпк от скопления). Моделирование конического истечения в предположении однородной МЗС позволило оценить фактор загрузки истечения, в хорошем согласии с немногочисленными другими измерениями для такой же низкой металличности, как и у NGC2366. Две статьи (Vasiliev et al. и Yarovova et al.) подготовлены к публикации и будут направлены в A&A Letters и MNRAS в скором времени (ожидаемо – в январе). Участники: Васильев, Герасимов, Егоров, Лозинская, Ярлова.

4) Проведен анализ многолетних архивных наблюдений с эталоном Фабри-Перо областей звездообразования в нашей Галактике в направлении рукавов Лебедя и Персея. По результатам, создан каталог лучевых скоростей ионизованного водорода для этих областей. Каталог содержит более 22 000 значений лучевых скоростей в направлении эмиссионных туманностей в этой части Галактики и может использоваться для поиска расширяющихся оболочек и ударных волн. Планируется публикация каталога в будущем и доступ к нему через сайт ГАИШ МГУ. Участники: Ситник, Лозинская

Всего за **5 лет выполнения проекта** были проведены детальные исследования кинематики, состояния ионизации газа и связи этих свойств с массивными звездами в 8 близких карликовых галактиках. Во всех объектах текущее звездообразование происходит в стенках гигантских сверхоболочек атомарного водорода, которые вероятно были сформированы коллективным действием предыдущих поколений массивных звезд. Мы обнаружили несколько десятков расширяющихся оболочек ионизованного газа размером от десятков до сотен парсек и связали их с действием либо сверхновых, либо ветра и теплового давления от массивных звезд класса O, WR или LBV. Благодаря особому вниманию близким карликовым галактикам в настоящем проекте, нам удалось существенно увеличить статистику оболочек с измеренной

кинетической энергией, скоростью расширения и возрастом в условиях низкой металличности. Наши измерения указывают на систематически пониженную энергию низкометаллических оболочек по сравнению с тем, что наблюдается в более массивных галактиках. При этом, вопреки существующим моделям, во многих областях мы наблюдаем значительный вклад притока энергии от звезд на стадиях, предшествующих вспышкам сверхновых, в общий энергетический баланс между массивными звездами и МЗС.

Анализ данных оптической панорамной спектроскопии и фотометрии с JWST и HST для выборки 19 спиральных галактик, выполненных в рамках совместной работы с коллаборацией PHANGS, позволил обнаружить множество расширяющихся оболочек газа и пыли в близких массивных галактиках. Как и для исследованных карликовых галактик, измерения энергии и давления газа в расширяющихся областях ионизованного газа указывают на существенную роль как сверхновых, так массивных звезд на стадиях, предшествующих сверхновым, в регулировании структуры и кинематики МЗС.

В ходе выполнения проекта мы обнаружили несколько неизвестных ранее уникальных звездных объектов, оказавшихся остатками сверхновых, звездами LBV или WR. В частности, один из таких объектов в низкометаллической галактике NGC4068 был изучен нами наиболее детально. Проведенное моделирование окружающей туманности показало, что наиболее вероятно этот объект является массивной ($\sim 80 M_{\text{sun}}$) низкометаллической звездой WR, существование которой не может быть объяснено стандартными эволюционными моделями для массивных звезд, но хорошо согласуется с предложенной недавно моделью эволюции для звезд с пониженным содержанием тяжелых элементов. В ходе проекта мы построили фотоионизационные модели Cloudy для туманностей вокруг нескольких других LBV звезд (включая известную звезду Романо в М33) и показали эффективность метода для одновременной оценки физических свойств как туманности, так и центральной звезды.

В то время как близкие галактики позволяют исследовать механизмы взаимодействия массивных звезд и межзвездной среды на больших масштабах и в различных окружениях, с существующими наблюдательными возможностями не возможно добиться такой же детализации, как при изучении областей звездообразования в нашей Галактике. В течение работы над проектом были выполнены наблюдательные исследования нескольких эмиссионных массивных звезд в нашей Галактике. В частности, была исследована спектральная переменность нескольких Be звезд и кандидатов в LBV, что в частности позволило выявить признаки формирования околозвездной оболочки в одном из объектов.

Особо детально на малых масштабах в проекте была изучена Галактическая область звездообразования в Лебеде в окрестностях звездного скопления vdB 130. Это скопление находится в стенке сверхоболочки вокруг ассоциации Cyg OB1. Анализ распределения идентифицированных здесь молодых звездных объектов и скоростей звезд из каталога GAIA позволил выделить «протоскопление» звезд, расположенное неподалеку от vdB 130. Наши наблюдения выявили эмиссионную оболочку

молекулярного газа вокруг скопления vdB 130. Обнаруженное протоскопление, по всей видимости, является результатом последовательного распространения звездообразования в стенке сверхоболочки вокруг Суг OB1. В целом, результаты многолетнего исследования этой области согласуются с картиной, наблюдаемой нами в других галактиках разной массы.

Результаты проведенных за 5 лет исследований указывают на значительную роль массивных звезд на всех стадиях их эволюции в регулировании структуры, динамики, химического состава МЗС и в распространении звездообразования в галактиках на масштабах до 1-3 кпк. Накопленный наблюдательный материал и его анализ является важным источником измерений характерных значений энергии, скоростей, возрастов расширяющихся оболочек и свойств связанного с ними звездного населения. Результаты проекта могут быть использованы для уточнения существующих моделей обратной связи между звездами и МЗС и роли этого процесса в эволюции галактик. Все поставленные задачи проекта выполнены успешно.