

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ.
М.В. ЛОМОНОСОВА

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ.
П.К. ШТЕРНБЕРГА

на правах рукописи

Егоров Олег Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОЙ И ПЫЛЕВОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ
МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ В ГАЛАКТИКАХ С БУРНЫМ
ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕМ IC 10 И VII ZW 403

(01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2011

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научные руководители: доктор физико-математических наук
Лозинская Татьяна Александровна
(ГАИШ МГУ, отдел радиоастрономии, ведущий научный сотрудник)

кандидат физико-математических наук
Моисеев Алексей Валерьевич
(САО РАН, лаборатория спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов, ведущий научный сотрудник)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Сильченко Ольга Касьяновна
(ГАИШ МГУ, руководитель отдела физики эмиссионных звезд и галактик)

доктор физико-математических наук
Курт Владимир Гдалевич
(АКЦ ФИАН, зам. директора, зав. отделом квантовой астрофизики)

Ведущая организация: Институт астрономии РАН

Защита состоится "2" июня 2011 года в 14 часов на заседании Диссертационного совета по астрономии МГУ им. М.В. Ломоносова, шифр Д 501.001.86
Адрес: 119991, Москва, Университетский проспект, д.13, ГАИШ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского Государственного университета им. М.В. Ломоносова (Университетский пр., 13).

Автореферат разослан "29" апреля 2011 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 501.001.86
д.ф.-м.н.

С.О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Исследования межзвездной среды в комплексах бурного звездообразования галактик — одна из актуальных задач современной астрофизики. В таких комплексах наиболее отчетливо проявляется эффект суммарного действия ионизирующей радиации, звездного ветра и вспышек сверхновых на окружающую межзвездную среду. Эти множественные источники излучения и механической энергии определяют физическое состояние, структуру и кинематику ионизованного и нейтрального газа, а также пыли в их протяженных окрестностях. Расширение оболочек и сверхоболочек, сформировавшихся под действием звездного ветра и сверхновых, инициирует новую волну звездообразования в остатках родительского гигантского молекулярного облака. Потеря вещества звезд в форме звездного ветра и при взрывах сверхновых обогащает газовую среду тяжелыми элементами. Согласно современным представлениям, действие сверхновых и звездного ветра в конечном счете определяет структуру, кинематику и химический состав галактики в целом, а также межгалактической среды.

Карликовые иррегулярные (dIrr) галактики и карликовые голубые компактные (BCD) галактики представляют собой оптимальные объекты для исследования взаимодействия звезд и межзвездной среды в комплексах бурного звездообразования. Цикл этого взаимодействия не прерывается здесь спиральными волнами плотности, толщина газового слоя больше, а плотность газа в dIrr галактиках меньше, чем в спиральных галактиках. Поэтому взаимодействие звезд и газа в них наблюдается на больших пространственных и временных масштабах, вплоть до формирования многооболочечных комплексов, сопоставимых по размеру с размером галактики.

В диссертации представлены результаты детальных исследований гигантских комплексов звездообразования в двух карликовых галактиках: BCD галактике VII Zw 403 и в dIrr галактике IC 10. Оба объекта характеризуются вспышкой современного звездообразования: BCD галактики являются таковыми по определению, в IC 10 наблюдаются четкие признаки бурного звездообразования, охватившего большую часть галактики.

В основе работы лежит материал, полученный на 6-метровом телескопе CAO РАН в рамках нескольких наблюдательных программ с панорамным мультизачковым спектрографом MPFS и с фокальным редуктором SCORPIO, работающем в режимах прямых снимков в узкополосных фильтрах (в линиях H_{α} , [SII] и [OIII]), длиннощелевой спектроскопии и сканирующего интерферометра Фабри-Перо (ИФП). В работе использованы также архивные данные наблюдений на VLA в линии 21 см и космического телескопа "Spitzer" в ИК диапазоне.

Цели работы

Основными задачами работы являлись:

- Поиск кинематических и спектральных признаков действия ударных волн, инициированных процессами звездообразования, на газовую среду карликовых галактик IC 10 и VII Zw 403;
- Определение относительного содержания кислорода, азота и серы в отдельных HII-областях обеих галактик. Сопоставление результатов наших спектральных наблюдений с современными теоретическими фотоионизационными моделями для анализа физических условий в комплексах звездообразования;
- Определение массовой доли полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в пылевой среде галактик. Анализ возможных механизмов образования и разрушения молекул ПАУ в межзвездной среде.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Измерены относительные обилия кислорода, азота и серы в 23-х областях HII галактики IC 10 и в 5 ярких комплексах HII галактики VII Zw 403. Найденные средние по галактике содержания кислорода составляют $12 + \log(O/H) = 8.30 \pm 0.31$ для IC 10 и $12 + \log(O/H) = 7.67 \pm 0.03$ для VII Zw 403. Обнаружены вариации $12 + \log(O/H) = 8.1 - 8.5$ между различными областями HII в IC 10.

2. Детально изучена кинематика и структура ионизованного газа в областях звездообразования галактик IC 10 и VII Zw 403. Обнаружены неизвестные ранее слабые волокнистые и диффузные ионизованные области в галактике VII Zw 403, которые мы сопоставили с более старым (10 млн. лет) населением последней вспышки звездообразования. Полученные новые, более точные значения скоростей расширения ярких оболочек в VII Zw 403 (15 – 20 км/с) не подтверждают оценки Линдс и др. [9] (50 – 70 км/с). В крыльях эмиссионных линий ряда областей найдены высокоскоростные движения со скоростями относительно максимума этих линий до 100 – 120 км/с в IC 10 и до 200 – 300 км/с в VII Zw 403. Такие скорости свидетельствуют об излучении газа за фронтом ударной волны.

Впервые обнаружены две оболочки нейтрального газа, размером 20 – 30'' (70–110 пк), вокруг ярчайших областей HII галактики IC 10. Определены скорости расширения этих нейтральных оболочек, составляющие 10 – 20 км/с.

3. В результате сопоставления с имеющимися теоретическими фотоионизационными моделями показано, что наши наблюдения галактики IC 10 лучше всего согласуются с моделями Мартин-Манжона и др. [12]. На основе этих ионизационных моделей по спектру областей HII галактики IC 10 определены параметр ионизации, возраст и масса ионизирующих скоплений. Найденный возраст скоплений заключен в пределах 2.5 – 5 млн. лет, а их массы — в пределах от 0.2×10^5 до $10^5 M_{\odot}$.

4. Найдена корреляция распределения массовой доли полициклических ароматических углеводородов (ПАН) с атомарным водородом и с облаками CO в галактике IC 10. Массовая доля ПАН падает лишь в окрестностях ярких областей HII и звезд WR. Анализ распределения ПАН в галактике VII Zw 403 не противоречит этим результатам. Найденная корреляция качественно согласуется с предположением об образовании молекул ПАН в молекулярных облаках и их разрушении под действием УФ-излучения и ударных волн. Обнаруженные вариации массовой доли ПАН от 1% до 4.5% в IC 10 могут быть объяснены недавней вспышкой

звездообразования.

5. Заподозрено существование корреляции между содержанием РАН и металличностью газа не только на уровне разных галактик в целом (это было известно ранее), но и локально, на уровне отдельных зон HII. Сделан вывод, что эта зависимость может проявляться до того, как начинается эффективное разрушение молекул РАН ультрафиолетовым излучением, и отражает особенности их формирования, а не последующей эволюции.

Научная новизна работы

Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми.

Оценки металличности для отдельных HII-областей обеих исследованных галактик получены нами впервые. В IC 10 определена металличность для 23-х туманностей (до нашей работы были известны металличности лишь трех ярчайших туманностей и среднее по галактике значение); в VII Zw 403 ранее была известна только средняя по галактике металличность.

Детальное исследование кинематики ионизованного газа комплекса звездообразования галактики IC 10 впервые позволило выделить области, в которых наблюдаются высокоскоростные крылья спектральных линий, свидетельствующие об излучении газа за фронтом ударной волны. Обнаружены две новые оболочки нейтрального газа, окружающие яркие ионизованные оболочки; измерены скорости их расширения.

Впервые обнаружены высокоскоростные движения в HII-комплексе №1 галактики VII Zw 403.

Ранее детальное исследование распределения полициклических ароматических углеводородов (РАН) в галактиках на уровне отдельных HII-областей было проведено только для Малого Магелланового Облака. В данной работе представлены результаты такого анализа в галактике IC 10. Впервые заподозрена корреляция металличности газа и массовой доли РАН на уровне отдельных HII-областей в одной галактике (ранее такая корреляция наблюдалась лишь при сравнении средних значений по разным галактикам).

Научная и практическая ценность работы

Ряд результатов, полученных в диссертационной работе, может оказаться полезным в дальнейших исследованиях действия звездного ветра и сверхновых на газовую и пылевую среду карликовых галактик. Нам удалось пролить свет на неясные пока механизмы образования и эволюции молекул полициклических ароматических углеводородов в межзвездной среде.

Основные результаты диссертации содержатся в следующих публикациях:

1. Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Авдеев В.Ю., Егоров О.В. "Структура и кинематика межзвездной среды области звездообразования в BCD галактике VII Zw 403 (UGC 6456)", Письма в Астрономический журнал, т.32, № 6, с.403-418, 2006.
2. Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Авдеев В.Ю., Егоров О.В., Подорванюк Н.Ю. "Структура и кинематика межзвездной среды в областях звездообразования неправильных и BCD галактик.", Труды совещания "Звездообразование в Галактике и за ее пределами", с.196-203., Москва, 2006.
3. Архипова В.П., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Егоров О.В. "Спектр свечения газа в области звездообразования в BCD галактике VII Zw 403 (UGC 6456).", Астрон.журн., 84, №11, с. 963-974, 2007.
4. Моисеев А.В., Егоров О.В., "Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. II. Дополнительные процедуры.", Астрофизический бюллетень, 63, №2, с. 193-204, 2008.
5. Лозинская Т.А., Егоров О.В., Моисеев А.В., Бизяев Д.В., "Спектр свечения газа в Irr галактике IC10", Письма в Астрономический журнал, т.35, №11, с.811-828, 2009.
6. Егоров О.В., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., "Область бурного звездообразования в Irr галактике IC 10: структура и кинематика ионизованного и нейтрального газа.", Астрономический журнал, т.87, №4, с.316-334, 2010.

7. Egorov O.V., Lozinskaya T.A., Moiseev A.V., "The region of a recent burst of star formation in the Irr Galaxy IC10: the emission spectra, structure, and kinematics of ionized and neutral gas" in: "Astrophysics and cosmology after Gamow", AIP Conference Proceedings, Volume 1206, pp. 375-381, 2010.
8. Архипова В.П., Егоров О.В., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., "Ионизованный газ в Irr галактике IC 10: спектр излучения и источники ионизации.", Письма в Астрономический журнал, т.37, с.83-101., 2011.
9. Вибе Д.З., Егоров О.В., Лозинская Т.А. "Полициклические ароматические углеводороды в карликовой галактике IC10.", Астрономический Журнал, 2011, №7 (в печати). Препринт — arXiv:1102.1060v1.

Личный вклад автора

В ходе выполнения работы автор:

- принимал участие в наблюдениях на 6-метровом телескопе САО РАН с фокальным редуктором SCORPIO и панорамным спектрографом MPFS;
- провел обработку наблюдений на 6-метровом телескопе и архивных данных наблюдений в линии 21 см на VLA и наблюдений космического ИК-телескопа "Spitzer", используя как готовое программное обеспечение, так и свои собственные процедуры, написанные на языке IDL;
- участвовал в обсуждении результатов наблюдений и выводов, которые из них следуют.

Аппробация результатов

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. Совещание "Звездообразование в Галактике и за ее пределами" (Россия, Москва, 2006).
2. Международная конференция "Астрономия и астрофизика начала XXI века." (Россия, Москва, 2008).

3. Международная конференция “Астрофизика и космология после Гамова: последние достижения и новые горизонты” (Украина, Одесса, 2009).
4. Международная конференция “Близкие карликовые галактики” (Россия, Нижний Архыз, 2009)
5. Всероссийская школа молодых ученых “Галактические и аккреционные диски” (Россия, Нижний Архыз, 2009)
6. Международная конференция “Динамика и эволюция дисковых галактик” (Россия, Пущино, 2010).
7. Международная конференция “Вселенная карликовых галактик” (Франция, Лион, 2010).

Содержание работы

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Общий объем диссертации составляет 149 страниц, включая 44 рисунка и список литературы из 117 наименований.

Структура диссертации

Во введении отмечена актуальность работы; перечислены основные задачи проведенных исследований; представлены основные результаты, выносимые на защиту; указан личный вклад автора; приведены списки опубликованных статей, содержащих основные результаты работы, и конференций, на которых эти результаты докладывались.

В первой главе приведены общие сведения об исследованных галактиках. Здесь же дано описание проведенных наблюдений обеих галактик на 6-метровом телескопе САО РАН с панорамным мультиспектральным волоконным спектрографом MPFS и с фокальным редуктором SCORPIO, работавшем в 3-х режимах — прямых снимков в эмиссионных линиях, щелевой спектроскопии и сканирующего интерферометра Фабри-Перо. Описаны особенности наблюдений с каждым прибором и методы обработки полученных данных. В конце

главы приведено описание использованных архивных данных наблюдений на VLA в линии 21 см и на космической ИК обсерватории “Spitzer”.

Во второй главе представлены результаты исследования межзвездной среды в комплексе современного звездообразования Irr галактики IC 10. Первая часть этой главы посвящена кинематике ионизованного и нейтрального газа по данным наших наблюдений на 6-м телескопе с ИФП и по архивным данным наблюдений на VLA.

Была получена серия так называемых P-V диаграмм (диаграмм позиция – скорость) в линиях H_{α} , $[SII]\lambda 6717\text{\AA}$ и HI 21 см через всю область современного звездообразования. В наиболее интересных местах построены профили линий H_{α} и $[SII]\lambda 6717\text{\AA}$; профили линий были аппроксимированы функцией Фойгта. В результате впервые обнаружены высокоскоростные компоненты линий (на уровне до 12% на скоростях 50 – 120 км/с от максимума линии) в каверне внутри наиболее яркой в комплексе звездообразования оболочечной туманности HL111 (по номинации каталога Ходжа и Ли [18]). Эти высокоскоростные движения свидетельствуют об излучении газа за фронтом ударной волны. Слабые высокоскоростные детали в крыльях линии выделены также в юго-западной части комплекса звездообразования.

Исследование распределения и кинематики нейтрального водорода в этой области позволило впервые выделить две внешние оболочки размером $20'' - 30''$ (70 – 110 пк), окружающие яркие ионизованные туманности HL111 и HL106. Выявлен эффект расширения этих нейтральных оболочек со скоростями 10 – 15 км/с и 15 – 20 км/с соответственно. Удалось обнаружить локальные “возмущения” скорости нейтрального газа на востоке и западе комплекса современного звездообразования в диапазоне от +30 км/с до –30 км/с.

На основании изучения кинематики ионизованного и нейтрального газа в туманности HL111, а также распределения избытка цвета $E(B - V)$ в области, были рассмотрены две возможные пространственные схемы взаимодействия тесной группы четырех звезд WR с окружающей межзвездной средой.

Проведено детальное исследование ионизованной оболочечной туманности HL106, которая наблюдается в направлении самого плотного молекулярного облака CO в галактике. Показано, что облако физически связано с

оптической туманностью: оболочка HL106 могла быть образована в результате фотодиссоциации молекулярного газа на границе этого облака под действием излучения звезд WR и двух скоплений.

Во второй части второй главы представлены результаты спектральных наблюдений галактики IC 10 со спектрографом с длинной щелью и с панорамным спектрографом MPFS. По этим данным получены оценки электронной плотности n_e и избытка цвета $E(B - V)$ для отдельных областей HII галактики. Обнаружены вариации избытка цвета от 0.8^m до 1.1^m внутри галактики.

В разделе 2.3.2 приведено описание трех использованных нами методов определения относительного содержания кислорода, азота и серы в областях HII по диагностическим отношениям интенсивностей спектральных линий. Рассмотрены T_e -метод из работы Изотова и др. [5], P-метод, предложенный Пилюгиным и Туаном [14], и O3N2-метод из работы Петтини и Пейджела [13].

Используя эти методы, мы оценили металличности 23-х областей HII IC 10. Ранее было известно относительное содержание кислорода только для трех ярчайших областей HII и для галактики в среднем (Леке и др. [8], Гарнетт [2]). Одновременно с нами оценку химсостава получили Магрини и Гонсалвес [10] для 9 планетарных туманностей и 15 областей HII. Для трех общих в нашей и их работах областей HII результаты хорошо согласуются. Полученное нами среднее значение содержания кислорода в галактике $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.30 \pm 0.31$ согласуется с оценками других авторов. Мы обнаружили вариации относительного содержания кислорода в разных областях HII в пределах $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.1 - 8.5$.

Полученные по нашим спектральным наблюдениям относительные интенсивности диагностических линий сопоставлены с современными теоретическими фотоионизационными моделями из работ Допита и др. [3], Сид Фернандес и др. [16] и Азари и др. [1], Чарлот и Лонгетти [19], Левеске и др. [7] и Мартин-Манжон и др. [12]. Показано, что наши наблюдения лучше всего согласуются с модельными расчетами Мартин-Манжон и др. [12]. Проведенные в этой работе расчеты использованы для анализа физических условий в областях HII, для оценки параметра ионизации, массы (от 0.2×10^5 до $10^5 M_\odot$) и возраста (2.5–5 млн. лет) ионизирующих скоплений. Основываясь на измеренной H_β -светимости туманности HL111 мы показали, что для ее ионизации

требуется около 60 звезд O5V.

Третья глава посвящена исследованию структуры, кинематики и спектра свечения газа в BCD галактике VII Zw 403 по результатам наблюдений на 6-м телескопе САО РАН. В первой части этой главы приведены результаты наблюдений галактики: исследования кинематики с ИФП и прямые снимки в эмиссионных линиях. Обнаружено множество слабых диффузных областей, неизвестных ранее. Выявлена “тонкая структура” так называемого “гигантского кольца”, которое впервые обнаружили Силич и др. [17]. За его пределами нами впервые найдены следы “внешней дуги”. Эти эмиссионные детали могут быть сопоставлены с более старым звездным населением последней вспышки звездообразования в галактике (10 млн. лет, согласно [9]).

Наша оценка светимости галактики $L_{H\alpha} = (1.49 - 1.86) \times 10^{39}$ эрг/с не подтвердила результаты, полученные Силичем и др. [17], но согласуется с более ранними оценками Линдс и др. [9] и Мартин [11]. Соответствующий найденной $H\alpha$ -светимости темп звездообразования составляет $SFR = 0.012 - 0.015 M_{\odot}/\text{год}$.

Проведен поиск высокоскоростных движений в газовой среде области звездообразования галактики VII Zw 403 по наблюдениям с ИФП и со спектрографом с длинной щелью. В самом ярком комплексе HII №1 впервые обнаружены высокоскоростные компоненты в крыльях линии [OIII] (до -200 – -300 км/с относительно центра линии) и слабая подложка в линии $H\alpha$ с FWHM = 630 км/с, что соответствует дисперсии скоростей до 270 км/с. Упомянутые в работе Линдс и др. [9] скорости расширения ярких комплексов HII, равные 50 – 70 км/с, нами не подтверждены. По нашим оценкам их скорость расширения составляет порядка 15 – 20 км/с, что соответствует возрасту 3 – 4 млн. лет и полностью согласуется с возрастом ионизирующих OB ассоциаций.

Во второй части третьей главы по проведенным спектральным наблюдениям получены оценки относительного содержания кислорода, азота и серы в отдельных комплексах HII галактики VII Zw 403. При этом использовались три метода, описанные в главе 2. До нашей работы была известна лишь средняя по галактике металличность. Сравнение полученных значений содержания кислорода и азота с теоретическими зависимостями Ланфранчи и Маттеучи [6]

дает хорошее согласие с моделью для четырех вспышек звездообразования в галактике и эффективностью звездообразования $\nu \approx 0.2 - 0.3$ млрд.лет⁻¹.

По наблюдениям с MPFS выявлено изменение относительных интенсивностей линий от центра к краю ярких комплексов HII. Этот эффект мы объяснили тем, что в центре комплекса HII вблизи компактной ОВ ассоциации газ находится в более высокой стадии ионизации, чем на границе.

В четвертой главе представлены результаты исследования пылевой составляющей межзвездной среды галактик IC 10 и VII Zw 403 по архивным данным наблюдений космического ИК-телескопа "Spitzer". Особое внимание уделено излучению молекул полициклических ароматических углеводородов (РАН), механизмы образования и разрушения которых пока окончательно не известны. Следуя методике, предложенной в работе Дрейна и Ли [4], мы оценили массовую долю РАН ($q_{РАН}$) в исследованных галактиках. В IC 10 найдены вариации $q_{РАН}$ от 1% до 4%, среднее значение для VII Zw 403 оказалось меньше 0.5%. Высокое значение массовой доли РАН и ее вариации в галактике IC 10 объяснены недавней вспышкой звездообразования, в результате которой эти молекулы были образованы, и успели разрушиться только в непосредственной близости к источникам УФ-излучения.

С целью прояснения механизма образования и разрушения молекул РАН, мы провели поиски корреляции массовой доли РАН с пространственным распределением молекулярного, атомарного и ионизованного газа, источников УФ-излучения, высокоскоростных движений газа под действием ударных волн, а также с металличностью газа в галактиках. В работе Сандстром и др. [15] была выявлена корреляция $q_{РАН}$ с отношением потоков в линиях $F_{8\mu}/F_{24\mu}$. В связи с этим мы использовали в качестве индикатора $q_{РАН}$ указанное отношение. На основании проведенного анализа мы показали, что наблюдаемое распределение РАН лучше всего объясняется гипотезой их образования в плотных молекулярных облаках и разрушения под действием УФ радиации. Достоверных свидетельств разрушения РАН под действием ударных волн нам обнаружить не удалось.

По наблюдениям галактики IC 10 заподозрена корреляция между массовой долей РАН и металличностью на уровне отдельных областей HII (ранее такая корреляция наблюдалась лишь при сравнении средних значений по раз-

ным галактикам). Если эта зависимость действительно имеет место, то она может отражать процессы образования РАН, а не дальнейшей эволюции. Исследования в этом направлении предполагается продолжить.

В *Заключении* суммируются основные выводы, представленные в работе.

Литература

- [1] *Азари и др.* (Asari N.V., Cid Fernandes R., Stasinska G., Torres-Papaqui J.P., Mateus A., Sodre L., Schoenell W., Gomes J.M.) The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *MNRAS*, 381, 263 (2007).
- [2] *Гарнетт* (Garnett D.R.) Nitrogen in irregular galaxies // *ApJ*, 363, 142 (1990).
- [3] *Допита и др.* (Dopita M.A., Fischera J., Sutherland R.S., Kewley L.J., Leitherer C., Tuffs R.J., Popescu C.C., van Breugel W., Groves B.A.) Modeling the Pan-Spectral Energy Distribution of Starburst Galaxies. III. Emission Line Diagnostics of Ensembles of Evolving H II Regions // *ApJ Suppl.Ser.*, 167, 177 (2006).
- [4] *Дрейн и Ли* (Draine B.T., Li A.) Infrared Emission from Interstellar Dust. IV. The Silicate-Graphite-PAH Model in the Post-Spitzer Era // *ApJ*, 657, 810 (2007).
- [5] *Изотов и др.* (Y.I. Izotov, G. Stasinska, G. Meynet, N.G. Guseva and T.X. Thuan) The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey // *A&A*, 448, 955–970 (2006).
- [6] *Ланфранчи и Маттеучи* (G.A. Lanfranchi and F. Matteucci) Chemical evolution of dwarf spheroidal and blue compact galaxies // *MNRAS*, 345, 71 (2003).
- [7] *Левеске и др.* (Levesque E.M., Kewley L.J., Larson K.L.) Theoretical Modeling of Star-Forming Galaxies. I. Emission-Line Diagnostic Grids for Local and Low-Metallicity Galaxies // *AJ*, 139, 712 (2010).

- [8] *Леке и др.* (Lequeux J., Peimbert M., Rayo J.F., Serrano A., Torres-Peimbert S.) Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies // *A&A*, 80, 155 (1979).
- [9] *Линдс и др.* (R. Lynds, E. Tolstoy, E.J. O'Neil and D.A. Hunter) Star Formation in and Evolution of the Blue Compact Dwarf Galaxy UGC 6456 Determined from Hubble Space Telescope Images // *ApJ*, 116, 146 (1998).
- [10] *Магрини и Гонсалвес* (Magrini L., Gonçalves D.R.) IC10: the history of the nearest starburst galaxy through its Planetary Nebula and HII region populations // *MNRAS*, 398, 280 (2009).
- [11] *Мартин* (C.L. Martin) The Impact of Star Formation on the Interstellar Medium in Dwarf Galaxies. II. The Formation of Galactic Winds // *ApJ*, 506, 222 (1998).
- [12] *Мартин-Манжон* (M.L. Martín-Manjón, M.L. García-Vargas, M. Mollá, and A.I. Díaz) POPSTAR evolutionary synthesis models II: optical emission-line spectra from giant HII regions // *MNRAS* 403, 2012 (2010).
- [13] *Петтини и Пейджел* (Pettini M., Pagel B.E.J.) [OIII]/[NII] as an abundance indicator at high redshift // *MNRAS*, 348, 59 (2004).
- [14] *Пилюгин и Туан* (L.S. Pilyugin and T.X. Thuan) Oxygen Abundance Determination in H II Regions: The Strong Line Intensities-Abundance Calibration Revisited // *ApJ*, 631, 231-243 (2005).
- [15] *Сандстром и др.* (Sandstrom K.M., Bolatto A.D., Draine B., Bot C., Stanimirovic S.) The Spitzer Survey of the Small Magellanic Cloud (S3MC): Insights into the Life Cycle of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons // *ApJ*, 715, 701 (2010).
- [16] *Сид Фернандес и др.* (Cid Fernandes R., Asari N.V. Sodre L., Stasinska G., Mateus A., Torres-Papaqui J.P., Schoenell W.) Uncovering the chemical enrichment and mass-assembly histories of star-forming galaxies // *MNRAS*, 375, 16 (2007).

- [17] *Силич и др.* (S. Silich, G. Tenorio-Tagle, C. Muñoz-Tuñón and L.M. Cairos) On the Recent History of Star Formation in the Blue Compact Dwarf Galaxy VII Zw 403 // *AJ*, 123, 2438 (2002).
- [18] *Ходж и Ли* (Hodge P., Lee M.G.) The H II regions of IC 10 // *PASP*, 102, 26 (1990).
- [19] *Чарлот и Лонгетти* (Charlot S., Longhetti M.) Nebular emission from star-forming galaxies // *MNRAS*, 323, 887 (2001).